

Repositionsergebnisse bei thorakolumbalen Frakturen in Bezug zur
spezifischen OP-Technik

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität Jena**

von B.Sc. Merle Ottich

geboren am 20.01.1990 in Göttingen

Gutachter

- 1. Prof. Dr. Dr. Gunther O. Hofmann, Jena**
- 2. apl. Prof. Dr. Peter Oelzner, Jena**
- 3. Prof. Dr. Christoph-Eckhard Heyde, Leipzig**

Tag der öffentlichen Verteidigung:

13.11.2019

Inhaltsverzeichnis

1 Abkürzungsverzeichnis	5
2 Zusammenfassung	6
3 Einleitung.....	8
3.1 Anatomie der Wirbelsäule.....	8
3.2 Pathologien der Wirbelsäule.....	9
3.3 Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen.....	10
3.4 Behandlung von Wirbelsäulenverletzungen.....	14
3.5 Repositionsverlust nach der Behandlung.....	19
4 Ziele der Arbeit.....	20
5 Methodik.....	22
5.1 Patienten.....	22
5.1.1 Einschlusskriterien.....	22
5.2 Methoden.....	23
5.2.1 Datenerhebung und -verarbeitung.....	23
5.2.2 Physiologische bGDW -Referenzwerte.....	24
5.2.3 AOSpine-Klassifikation, McCormack Score.....	25
5.3 Statistische Auswertung.....	26
6 Ergebnisse	27
6.1 Deskriptive Daten der Gesamtstichprobe.....	27
6.1.1 Patientenkollektiv.....	27
6.1.2 Veränderung der bGDW über die Zeit	28
6.1.3 Lokalisation der Wirbelsäulenverletzung.....	28
6.1.4 Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen	30
6.1.5 Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen	32
6.1.6 Häufigkeiten der HU-Gruppen.....	33
6.2 Deskriptive Daten der Teilstichprobe	34
6.2.1 Patientenkollektiv.....	34
6.2.2 Veränderung der bGDW über die Zeit	34
6.2.3 Lokalisation der Wirbelsäulenverletzung.....	35
6.2.4 Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen	37
.....	38

6.2.5 Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen	38
6.2.6 Häufigkeiten der HU-Gruppen.....	40
6.3 Beantwortung der Hypothesen	41
6.3.1 Hypothese 1	41
6.3.2 Hypothese 2.....	42
6.3.3 Hypothese 3.....	43
6.3.4 Hypothese 4.....	43
6.3.5 Hypothese 5.....	44
6.3.6 Hypothese 6.....	44
7 Diskussion	45
7.1 Diskussion der Methoden.....	45
7.2 Diskussion der Ergebnisse	50
8 Schlussfolgerung	54
9 Literaturverzeichnis	55
10 Anhang	63
10.1 Tabellenverzeichnis.....	63
10.2 Abbildungsverzeichnis	64
10.3 Ehrenwörtliche Erklärung.....	66

1 Abkürzungsverzeichnis

AOSpine-Klassifikation:	AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System
BWK:	Brustwirbelkörper
BWS:	Brustwirbelsäule
DXA:	Doppelröntgenenergieabsorptiometrie
GDW:	Grund-Deckplatten-Winkel
_b GDW:	bisegmentaler Grund-Deckplatten-Winkel
HU:	Hounsfield Units
ICD:	International Classification of Diseases
ICD-10-GM:	International Classification of Diseases, 10. Revision, German Modification
L:	Lumbalwirbel
LWK:	Lendenwirbelkörper
LWS:	Lendenwirbelsäule
McCormack-Klassifikation:	Load Sharing Classification of Spine Fractures
OPS:	Operationen- und Prozedurenschlüssel
SWK:	Sakralwirbelkörper
T:	Thorakalwirbel
TLICS-Klassifikation:	Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score
TLÜ:	Thorakolumbaler Übergang

2 Zusammenfassung

Bei der operativen Behandlung von thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen mittels Fixateur interne gibt es verschiedene chirurgische Herangehensweisen, welche je nach Schule und Erfahrung der Operateure angewandt werden, ohne dass es einen wissenschaftlichen Beleg für einen möglicherweise vorhandenen Vorteil hinsichtlich des langfristigen Ergebnisses für eine der Methoden gibt. Im BG Klinikum Bergmannstrost Halle (Saale) lassen sich die Chirurgen der unfallchirurgischen Abteilungen zwei verschiedenen Schulen hinsichtlich der Operationstechniken bei Wirbelsäulenverletzungen zuordnen: Distraction/Lordosierung = „AOSpine-Methode“ oder Lordosierung/Distraction = „Kluger-Methode“. Es wurde vermutet, dass bei der Kluger-Methode durch die initiale Lordosierung mit dorsaler Verkürzung eine bessere Lordosierung und dadurch eine bessere initiale als auch langfristige Reposition erreicht wird. Das initiale Repositionsergebnis beider Methoden wurde mit eigens erstellten hypothetischen physiologischen bisegmentalen Grund-Deckplatten-Winkeln (bGDW) verglichen. Außerdem wurde der Zusammenhang zwischen dem Repositionsergebnis und zwei weit verbreiteten und häufig bei Wirbelsäulenverletzungen angewandten Scores untersucht. Die Untersuchung des Einflusses der Knochendichte auf den Repositionsverlust war ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

In der retrospektiven Analyse von einem Zeitraum von ca. 15 Jahren (2001 bis 2016) wurden 1538 Patientenfälle mit Fixateur interne OP untersucht und das Repositionsergebnis in allen vorhandenen Röntgen- und CT-Bildern unter Verwendung des sagittalen Cobb-Winkels ausgemessen. Die Verletzungen wurden nach dem AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System (AOSpine-Klassifikation) und der Load Sharing Classification of Spine Fractures nach McCormack (McCormack-Klassifikation) klassifiziert. Der mittlere Hounsfield-Unit-Wert (HU-Wert) wurde durch Vermessung des kranial und kaudal an den frakturierten Wirbelkörper angrenzenden Wirbelkörper ermittelt.

Es konnten 620 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Mit der Kluger-Methode konnte ein initial besseres Repositionsergebnis, also eine größere Änderung des vor der OP bestehenden Grund-Deckplatten-Winkels (GDW) des betroffenen Segmentes und somit eine Reduzierung der pathologischen Kyphose erreicht werden. Diese initialen Repositionsergebnisse lagen näher an den hypothetischen physiologischen bGDW als die Repositionsergebnisse der AOSpine-Methode. Bei 170 Fällen

(AOSpine-Gruppe = 139, Kluger-Gruppe = 31) mit vergleichbaren Follow-Up-Zeiträumen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Methoden hinsichtlich des Repositionsergebnisses nach sechs Monaten nachgewiesen werden, allerdings kam es bei beiden Gruppen zu einem signifikanten Repositionsverlust. Die Klassifikation nach McCormack und nach AOSpine zeigten keinen signifikanten Zusammenhang mit dem Repositionsverlust nach sechs Monaten. Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss der HU-Werte auf den Repositionsverlust – Patienten mit besonders niedrigen HU-Werten hatten einen signifikant stärkeren Repositionsverlust innerhalb von sechs Monaten als Patienten die besonders hohe HU-Werte aufwiesen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sollten die Einschränkungen dieser Studie beachtet werden. Hier sind insbesondere methodische Defizite zu nennen, da sowohl Röntgen- als auch CT-Bilder mit unterschiedlichster Qualität, die nicht unter standardisierten Bedingungen aufgenommen worden sind, verwendet wurden. Dies hat möglicherweise zur Fehlklassifizierung der Verletzungen beigetragen, ebenso wie die fehlende klinische Erfahrung der Auswerterin. Nicht dokumentierte zusätzliche stabilisierende Verfahren können das Repositionsergebnis verfälscht haben. Die ungleichen Fallzahlen in der Stichprobe, die zur Untersuchung der Hypothesen bezüglich des langfristigen Repositionsverlustes verwendet wurden, sind ebenfalls kritisch zu bewerten.

Es lässt sich der Schluss ziehen, dass keine der beiden untersuchten Methoden des intra-operativen Vorgehens einen vorteilhaften Einfluss auf den langfristigen Repositionsverlauf zu haben scheint. Der Vergleich der Repositionsergebnisse mit den Werten der hypothetischen physiologischen bGDW ist mit Einschränkungen verbunden, da jeder Mensch ein individuelles sagittales Wirbelsäulenprofil hat, welches zudem von Geschlecht und Alter beeinflusst wird. Mit der McCormack-Klassifikation sollen Frakturen identifiziert werden können, bei denen es bei alleinigem dorsalen Vorgehen zu einem Versagen des Implantats und dadurch zu einem Repositionsverlust kommen wird. In der hier untersuchten Stichprobe konnte keine signifikante Korrelation zwischen dem McCormack-Score und dem Repositionsverlust gefunden werden. Auch für die AOSpine-Klassifikation, die vor allem der detaillierten Frakturbeschreibung dient, konnte kein signifikanter Zusammenhang zum langfristigen Repositionsverlust gefunden werden. Dass bei höheren HU-Werten langfristig signifikant bessere Repositionsergebnisse zu finden waren spiegelt ähnliche Ergebnisse in der Literatur wieder.

3 Einleitung

3.1 Anatomie der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule ist ein bedeutsamer Teil des knöchernen Skeletts des Menschen – sie überträgt die Last des Rumpfes über das Becken auf die Beine und ist als dynamisches Element bei vielen Bewegungen des Körpers beteiligt. Gleichzeitig bildet die Wirbelsäule einen schützenden Knochenkanal für das Rückenmark (Spinalkanal).

Physiologisch besteht die sagittale Ausrichtung der adulten Wirbelsäule aus einem „Doppel-S“ – Zervikallordose, Thorakalkyphose, Lumballordose, Sakralkyphose. Diese Form ermöglicht eine Abfederung von Belastungen und ist im Verlaufe der Evolution und der Entwicklung des Menschen zum zweibeinigen Laufen entstanden (Schünke et al. 2014). Die Brustwirbelsäule (BWS) und Lendenwirbelsäule (LWS) werden unter klinischen Gesichtspunkten noch weiter unterteilt in einen thorakalen Anteil (Brustwirbelkörper (BWK) 1 bis BWK 10), einen thorakolumbalen Übergang (TLÜ; BWK 11 bis Lendenwirbelkörper (LWK) 2) und eine untere LWS (LWK 3 bis LWK 5) (Tscherne und Blauth 1998).

Neben den knöchernen Anteilen wird die Wirbelsäule noch von diversen Bändern und Muskeln (M. erector spinae, autochthone Rückenmuskulatur) zusammengehalten und gestützt. Anterior der Wirbelkörper verläuft das Lig. longitudinale anterius, an der Rückfläche der Wirbelkörper das Lig. longitudinale posterius. Zwischen den Wirbelbögen verlaufen die Ligg. flava, zwischen den Procc. spinosi die Ligg. interspinalia und auf ihnen das Lig. supraspinale und zwischen den Procc. transversi das Lig. intertransversarium. Zwischen den Wirbelkörpern liegen die Disci intervertebrales (Zwischenwirbelscheiben, Bandscheiben), welche Stöße abdämpfen und somit die einwirkenden Kräfte gleichmäßig auf die Deck- und Grundplatten der Wirbelkörper verteilen (Schünke et al. 2014). Dabei machen die Knochen, Bänder und Bandscheiben den passiven und die Muskeln den aktiven Anteil der Wirbelsäule aus, letztere haben sowohl eine reflektorische als auch eine willkürliche Funktion.

Bei der genaueren Betrachtung der Wirbelsäule teilt man diese in einzelne Bewegungssegmente ein. Embryologisch entwickelt sich ein Wirbelkörper aus zwei Sklerotomen, indem sich ein kaudaler und ein kranialer Sklerotomabschnitt zu einer Wirbelkörperanlage vereinen und in der sechsten Entwicklungswoche anfangen zu verknorpeln. Dadurch wird die Chorda dorsalis nach kranial bzw. kaudal verdrängt, woraus

sich dann der Discus intervertebralis bildet. Da die Myotome auf der Höhe der ursprünglichen Sklerotome und embryonalen Segmente verbleiben, verbinden sie nun zwei Wirbelkörperanlagen und komplettieren das Bewegungssegment. Dieses besteht aus zwei benachbarten Wirbeln, dem dazwischenliegenden Discus intervertebralis, den paarigen Artt. zygapophysiales (Wirbelbogengelenke) und den Muskeln, Bändern, Nerven und Blutgefäßen auf der jeweiligen Höhe. Insgesamt gibt es 25 Bewegungssegmente in der Wirbelsäule, welche zusammen sowohl funktionell als auch morphologisch eine Einheit bilden, sodass sich eine Verletzung eines Bewegungssegments aufgrund der veränderten Statik immer auch auf die anderen auswirkt (Berthonnaud et al. 2005, Schünke et al. 2014).

3.2 Pathologien der Wirbelsäule

Die Ätiologie von Wirbelsäulenverletzungen besteht heutzutage vor allem aus „Stürzen aus der Höhe“, Verkehrsunfällen und „banalen Stürzen“ (Reinhold et al. 2009a).

Besonders die Osteoporose stellt im Alter einen wichtigen Risikofaktor dar, so sind Wirbelkörperbrüche die häufigste klinische Manifestation einer (Involutionen-) Osteoporose (Scheidt-Nave 2003, Josten et al. 2012, Spiegl et al. 2017). Ursächlich liegt dabei häufig ein inadäquates Trauma (beispielsweise Stolpern über die Teppichkante mit folgendem Sturz) zugrunde, welches im osteoporotischen Knochen schnell zu Brüchen führen kann (Spiegl et al. 2017). Aber auch alltägliche Tätigkeiten ohne signifikante Traumata können zu osteoporotischen Frakturen führen, welche häufig initial unentdeckt bleiben (Rajasekaran et al. 2017a). Auch wenn eindeutige epidemiologische Daten fehlen wird vermutet, dass 60–75% der osteoporotischen Wirbelsäulenverletzungen klinisch stumm verlaufen und nur weniger als 10% überhaupt zu einer Einweisung in die Klinik führen (Schnake et al. 2017a).

Es wird geschätzt, dass in Deutschland ungefähr 10.000 relevante Wirbelsäulenverletzungen pro Jahr auftreten, wobei diese Zahl vermutlich um einiges höher wäre, wenn auch leichtere Verletzungen dazugezählt würden (Maier et al. 2010). Da unsere Gesellschaft ein zunehmend höheres Lebensalter erreicht, ist zu erwarten, dass die Häufigkeit von osteoporotischen Wirbelsäulenverletzungen noch weiter zunehmen wird.

Die Lokalisationen von Wirbelsäulenverletzungen sind ungleichmäßig auf die gesamte Wirbelsäule verteilt. Der Großteil der Verletzungen betrifft den TLÜ, der Rest teilt sich

fast gleichmäßig auf den lumbalen und den thorakalen Bereich auf (mit absteigender Häufigkeit) (Reinhold et al. 2009a). Die besonders starke Anfälligkeit des TLÜ liegt in der Anatomie begründet, da hier die thorakale Kyphose in die lumbale Lordose übergeht, der im Vergleich zur BWS schützende Brustkorb wegfällt und die kleinen Wirbelgelenke ihre Lage von einer frontalen hin zu einer eher sagittalen Ausrichtung verändern, womit eine zunehmende Rotationssteifigkeit einhergeht (Tscherne und Blauth 1998). Hinsichtlich der Klassifikation (AO-/Magerl-Klassifikation) wurde in der Multicenterstudie von Reinhold und Kollegen (Reinhold et al. 2009a) bei ca. 63% des Kollektivs eine Typ A, bei ca. 21% eine Typ B und bei ca. 16% eine Typ C Verletzung diagnostiziert; speziell im TLÜ waren es ca. 71% Typ A, ca. 18% Typ B und ca. 11% Typ C Verletzungen.

Die Beschwerden die eine Wirbelsäulenverletzung verursacht sind stark abhängig von ihrem Ausmaß. Diese können von keinen oder nur leichten Rückenschmerzen, vor allem bei osteoporotischen Wirbelsäulenverletzungen, bis hin zu stärksten akuten Rückenschmerzen, neurologischen Ausfällen und Querschnittslähmungen reichen. Gerade bei den osteoporotischen Wirbelsäulenverletzungen, die initial häufig unauffällig sind, kann es durch die wiederholte Krafteinwirkung im Alltag zu einer zunehmenden Kyphose und daraus resultierenden Beschwerden kommen (Spiegel et al. 2017).

3.3 Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen

Klassifikationen verbessern den (internationalen) wissenschaftlichen Austausch und beinhalten zumeist Therapieempfehlungen, welche eine Erleichterung für den klinischen Alltag bedeuten. Des Weiteren erlauben sie eine gewisse Vergleichbarkeit hinsichtlich der Therapieformen, was für die Weiterentwicklung dieser von großem Nutzen ist. Die Beschreibung bzw. Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen hat in den letzten Jahrzehnten vielgestaltige Veränderungen und Fortschritte erfahren. Begünstigt wurde dieser Prozess durch die ebenfalls in den letzten Jahrzehnten stattgehabte (Weiter-)Entwicklung der bildgebenden und chirurgischen Verfahren.

Eine erste Einteilung in stabile (anteriore und laterale Wedge-Fraktur, Lamina-Frakturen oberhalb von LWK 4) und instabile Frakturen (Fraktur-Subluxationen mit Ruptur des Lig. interspinosus, Fraktur-Dislokationen, Lamina-Frakturen auf Höhe LWK 4 oder 5) nahm Nicoll (Nicoll 1949) vor. Stabile Frakturen haben kein Risiko einer progredienten Verschlechterung der Deformität oder Beeinträchtigung der nervalen Strukturen. Bei instabilen Frakturen hingegen besteht die Gefahr, dass eine Verschlechterung der

Deformität eintritt und dabei nervale Strukturen z.B. durch Frakturanteile (noch stärker) verletzt werden oder der Spinalkanal stenosierte wird. Des Weiteren unterschied er vier Frakturtypen: „anterior wedge fracture“, „lateral wedge fracture“ (Flexions-Rotations-Verletzung), „fracture-dislocation“ (rupture of the posterior interspinous ligament) und „isolated fracture of the neural arch“ (Rotationsverletzungen).

Die Einteilung in stabile und instabile Frakturen von Nicoll (Nicoll 1949) übernahm Holdsworth (Holdsworth 1963) und erweiterte diese, indem er anhand des Frakturmechanismus vier verschiedene Typen von Krafteinwirkung unterschied: Flexion, Flexion und Rotation, Extension und Kompression. Die unterschiedlich stark beteiligten hinteren Bandstrukturen (Kapsel, Ligg. interspinalia, Lig. supraspinale, Ligg. flava) wurden ebenfalls einbezogen, da diese maßgeblich für die Stabilität der Wirbelsäule verantwortlich sind und somit bei der Therapieentscheidung berücksichtigt werden müssen.

Das Zwei-Säulen-Modell der Wirbelsäule von Kelly & Whitesides (Kelly und Whitesides 1968) setzt sich aus einer anterioren Säule, welche aus den soliden Wirbelkörpern besteht, und aus einer posterioren Säule, bestehend aus den Wirbelbögen, zusammen. Letztere sind zwar nicht primär die lastaufnehmende Struktur der Wirbelsäule, haben nach Kelly & Whitesides aber eine ausreichende Stärke, um bei Versagen der anterioren Säule die axiale Last zu übernehmen. Aufbauend auf die Einteilung in stabile und instabile Verletzungen stellten sie eine weitere Klassifikation für „lumbodorsale Verletzungen“ vor.

1983 wurde von Denis (Denis 1983) das Drei-Säulen-Modell vorgestellt. Dem bis zu diesem Zeitpunkt akzeptierten Zwei-Säulen-Modell fügte Denis eine osteoligamentäre mittlere Säule (posteriore Wand des Wirbelkörpers, Lig. longitudinale posterius, posteriorer Anulus fibrosus) hinzu. Nach Denis entsteht durch die Ruptur der hinteren Säule allein noch keine Instabilität, sondern erst dann, wenn auch das Lig. longitudinale posterius und der hintere Teil des Anulus fibrosus beteiligt sind. Es entstand eine neue Klassifikation von thorakolumbalen Verletzungen, welche lediglich Minor- (Fraktur des Proc. articularis, des Proc. transversus, des Proc. spinosus und der Pars interarticularis) und Major-Verletzungen (Kompressions-Frakturen, Burst-Frakturen, „Seat-Belt-Type“ Verletzungen und Fraktur-Dislokationen; jede Gruppe jeweils nochmal in Subtypen unterteilt) unterschied.

Die bei Wirbelsäulenverletzungen unterschiedlich starke Beteiligung der mittleren Säule wurde von McAfee (McAfee et al. 1983) für eine neue Klassifizierung von

thorakolumbalen Verletzungen verwendet. Hinsichtlich der einwirkenden Kräfte wurde die axiale Kompression, die axiale Distraction und die Translation innerhalb der Transversalebene unterschieden, woraus sechs verschiedene Arten von Verletzungen resultieren konnten.

In einer retrospektiven Analyse untersuchten McCormack et al. (McCormack et al. 1994) mehrere Fälle, bei denen es nach einer kurzstreckigen Versorgung von Wirbelsäulenfrakturen mit dem Variable-Screw-Plating-(VSP)-System nach Steffee (eine winkelstabile Platten-Schrauben-Kombination) zu Schraubenbrüchen und Korrekturverlusten gekommen war. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse entstand eine neue Klassifikation, die „Load Sharing Classification of Spine Fractures“, welche auch in dieser Arbeit verwendet wurde (hier abgekürzt als „McCormack-Klassifikation“). Drei Kriterien werden zur präoperativen Beurteilung einer Wirbelsäulenverletzung herangezogen: 1.) das Ausmaß der Zertrümmerung des frakturierten Wirbelkörpers, 2.) das Ausmaß der Verlagerung der Frakturteile und 3.) das Ausmaß der therapeutischen Korrektur der pathologischen Kyphose. Eine dreistufige Schweregradbeurteilung bei jedem der drei Kriterien ergibt am Ende einen minimalen Wert von drei und einen maximalen Wert von neun. Je höher der Wert, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Implantatversagen kommen könnte, da ein stark frakturierter Wirbelkörper, eine starke Verlagerung der Frakturteile und eine starke Korrektur der kyphotischen Deformität dazu führen, dass von der vorderen Säule weniger bis gar keine Last mehr getragen werden kann, womit ein eingebrachtes Implantat im Gegenzug einer starken Lastaufnahme ausgesetzt wäre. So hatten bei McCormack und Kollegen alle Fälle mit Schraubenbruch einen Wert von sieben oder mehr (mittlerer Follow-Up Zeitraum = vier Jahre). Zu beachten ist allerdings, dass bei dieser Klassifikation weder die Integrität der Bänder noch der Verletzungsmechanismus Berücksichtigung finden.

Im gleichen Jahr stellten Magerl und Kollegen (Magerl et al. 1994) eine weitere Klassifikation vor, bei der der jeweilige Verletzungsmechanismus die drei verschiedenen Fraktur-Typen A–C (Typ A: Kompression, Typ B: Distraction, Typ C: axiale Torquierung) bestimmt, welche dann anhand der pathomorphologischen Aspekte jeweils in drei Gruppen (A1–A3, B1–B3, C1–C3) und diese noch einmal genauer in jeweils drei Subgruppen (A1/2/3, B1/2/3, C1/2/3), zum Teil auch noch in weitere Untergruppen, unterteilt werden. Diese Einteilung folgt damit dem AO-Fraktur-Klassifikations-Schema. Dabei nimmt der Schweregrad der Verletzung (u.a. anhand des

Instabilitätsgrades beurteilt) von Typ A über Typ B und C samt ihren Untergruppen hierarchisch zu. Für die Einteilung anhand der pathomorphologischen Aspekte wurde das Zwei-Säulen-Modell nach Whitesides (Whitesides 1977) zugrunde gelegt.

Um für den klinischen Alltag eine einfachere und praktikablere Klassifikation zur Verfügung zu haben, erarbeitete das Team um Vaccaro den Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score (hier abgekürzt als „TLICS-Klassifikation“) (Vaccaro et al. 2005), welche zusätzlich noch eine Hilfe hinsichtlich der Therapieentscheidung mit sich bringen sollte. Bei der TLICS-Klassifikation werden objektive klinische Indikatoren, die mit dem potentiellen Outcome zusammenhängen, bewertet: die Morphologie der Verletzung (anhand bildgebender Befunde), der Zustand des posterioren Bänderkomplexes und der neurologische Status. Der aus diesen Unterpunkten gebildete Summenscore ordnet die Patienten entweder der operativen oder der konservativen Therapiegruppe zu und die Beurteilung des posterioren Bänderkomplexes und des neurologischen Status helfen bei der Auswahl der optimalen operativen Vorgehensweise (anteriores, posteriores oder kombiniertes Verfahren).

Da weder die Magerl-Klassifikation noch die TLICS-Klassifikation international breite Anwendung fanden und hinsichtlich der Reliabilität Einschränkungen aufweisen, entwickelten Vaccaro und Kollegen zusammen mit der AOSpine Klassifikations-Arbeitsgruppe (Vaccaro et al. 2013) das AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System (hier abgekürzt als „AOSpine-Klassifikation“) mit dem Ziel, eine international akzeptierte Klassifikation einzuführen, welche den internationalen Austausch und die Weiterentwicklung von Therapiestrategien bei thorakolumbalen Verletzungen der Wirbelsäule erleichtern sollte. Die AOSpine-Klassifikation berücksichtigt die Morphologie der Fraktur (Typ A: Kompression, Typ B: Distraktion, Typ C: Rotation bzw. totale Zerreißung der Wirbelsäule), den neurologischen Status und weitere für die Therapieentscheidung relevante klinische Faktoren (unklarer Defekt eines Längsbandes, Komorbiditäten). Typ A und Typ B werden zusätzlich noch in weitere Untergruppen aufgeteilt (A0–A4, B1–B3). Auch diese Klassifikation beinhaltet eine hierarchische Zunahme des Schweregrades vom Typ A bis zum Typ C. Zusammen mit einem internationalen Team aus AOSpine Chirurgen (AOSpine Trauma Knowledge Forum) entwickelten Vaccaro und Kollegen (Vaccaro et al. 2016) drei Jahre später eine Empfehlung für den chirurgischen Algorithmus bei Verwendung der AOSpine-Klassifikation. Jeder Patient erhält einen individuellen Punktwert, welcher sich aus der Frakturklassifikation (null bis acht

mögliche Punkte), dem neurologischen Status (null bis vier mögliche Punkte) und den patientenspezifischen klinischen Faktoren (null bis ein möglicher Punkt) zusammensetzt. Bis zu einem Punktwert von drei wird eine konservative, ab fünf eine chirurgische Therapie empfohlen – bei einem Punktwert von vier oder fünf kommen beide Therapieansätze in Frage.

3.4 Behandlung von Wirbelsäulenverletzungen

Bei der Wahl der optimalen Therapie steht nicht nur die Linderung der akuten Beschwerden im Mittelpunkt, sondern auch die Absicht, potentiell aus der Verletzung folgende Beschwerden und Funktionseinschränkungen möglichst vorzubeugen. Trotz allem ist die *restitutio ad integrum* bei dem Großteil der Wirbelsäulenverletzungen nicht möglich – selbst bei einem optimalen funktionalen Ergebnis ist der (verheilte) Defekt radiologisch fast immer noch sichtbar (Tscherne und Blauth 1998). Beispielsweise bleibt ein Defekt der Bandscheibe aufgrund ihrer nicht vorhandenen Regenerationsfähigkeit immer bestehen. Zudem kommt es häufig zu einer Versteifung des betroffenen Bewegungssegmentes.

Die ersten Zeugnisse von Behandlungsansätzen bei Wirbelsäulenverletzungen finden sich (nach dem heutigen Stand der Wissenschaft) im Edwin Smith Surgical Papyrus (Breasted 1930), dessen Text vermutlich zwischen 2600 bis 2150 v.C. erstmalig niedergeschrieben wurde und verschiedene Fallberichte enthält, wovon sich insgesamt sechs mit Wirbelsäulenverletzungen und den Therapiemöglichkeiten befassen.

Auch Hippokrates beschäftigte sich mit Wirbelsäulenverletzungen und therapierte diese mittels Distraction auf einer Streckbank und Druckausübung auf den Scheitelpunkt der pathologischen Krümmung (Diller 1962). Auch noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts stand die konservative Therapie im Vordergrund. So empfahl Davis (Davis 1929) die Hyperextension als erfolgsversprechende Methode bei der Behandlung von akuten Trümmerbrüchen und auch Watson Jones (Watson Jones 1931) entwickelte eine konservative hyperextendierte Lagerungsmethode mit anschließender Gipsstabilisierung. Dieser wurde von den Patienten für zweieinhalb bis sechs Monate lang getragen und mit frühzeitiger Mobilisierung und Muskelkräftigungsübungen konnte Watson Jones bei sechs von seinen sieben Patienten eine gute finale anatomische Reposition erreichen. Dabei lag die Fraktur bei allen Patienten im Bereich des thorakolumbalen Übergangs (BWK 12 bis LWK 2). Auch Böhler leistete mit seinem dreistufigen Ansatz: Reposition, anschließende Retention in Gipsverbänden und

regelmäßigen Übungsbehandlungen einen entscheidenden Beitrag zur konservativen Behandlung von Wirbelsäulenverletzungen ohne Lähmungen, welcher auch heute noch die Grundlage der konservativen Therapie bei A1 und A2 Frakturen bildet (Tscherne und Blauth 1998).

Die erste in der chirurgischen Literatur dokumentierte dorsale Stabilisierung führte B.E. Hadra im Jahr 1981 durch, indem er Silberdrähte um die Proc. spinosi zweier frakturierter Halswirbelkörper wickelte (Hadra 1975).

1949 widerlegte Nicoll (Nicoll 1949) mit seiner Studie die damals weit verbreitete Annahme, dass eine gute anatomische Rekonstruktion die Voraussetzung für ein gutes funktionelles Ergebnis sei. Die Methodik der Hyperextension nach Davis bzw. Watson Jones (Davis 1929, Watson Jones 1931) beurteilte er als eher unpassend und empfahl als adäquatere Methode die Stabilisierung in möglichst physiologischer Position zur Erreichung der spontanen anterioren Fusion. Er betonte die Schwierigkeiten der Stabilisierung mittels Gips (Gefahr von Druckstellen) und schlug vor: "In the absence of plaster fixation, reduction can be maintained only by some form of graft or internal fixation which is self-stabilising [...]" (Nicoll 1949). Auch Nicoll hatte zumindest die Idee einer „inneren Fixierung“ von Wirbelsäulenverletzungen, auch wenn es bis zur endgültigen technischen Umsetzung dieser noch einige Jahre dauern sollte.

Holdsworth & Hardy (Holdsworth und Hardy 1953) berichteten 1953 von ihrer Studie an Paraplegie-Patienten nach thorakolumbalen Verletzungen. Instabile Frakturen versorgten sie operativ mittels innerer Fixierung durch eine in die Proc. spinosi ober- und unterhalb des frakturierten Wirbelkörpers verankerte Platte und beobachteten keine Redislokationen bei den 19 auf diese Art versorgten Patienten.

Eine andere Variante zur inneren Fixierung geht auf Harrington (Harrington 1962, Harrington 1988) zurück, ursprünglich entwickelt für die Behandlung von skoliotischen Wirbelsäulenveränderungen durch Poliomyelitis. Das Harrington-Instrumentarium besteht aus einem System aus Schrauben, die am Proc. transversus, am Proc. articularis oder an der Lamina eingehakt und dann mit Stäben verbunden werden. Über dieses System können Distraktions- und Kompressionskräfte zur Korrektur ausgeübt und die finale Position letztendlich fixiert werden.

Die Chirurgie der Wirbelsäulenverletzungen wurde 1976 von Roy-Camille (Roy-Camille et al. 1976) durch Einführung der Pedikelschrauben geradezu revolutioniert.

Bei instabilen Frakturen mit Beteiligung des mittleren Anteils des Wirbelkörpers (posteriore Wand, Proc. articularis, Pedikel) und bei Frakturen mit Beteiligung der nervalen Strukturen hielt Roy-Camille eine Platten-Osteosynthese für indiziert. Die zwischen Pedikel und Proc. articularis liegenden Platten werden mittels Schrauben, die durch die Pedikel bis in den Wirbelkörper konvergierend eingebracht werden, befestigt.

Bei der Entwicklung seiner neuen Klassifikation berücksichtigte McAfee (McAfee et al. 1983) insbesondere die einwirkenden Kräfte bei der Frakturentstehung. Die vordere Säule ist gegenüber Kompressionskräften und die hintere Säule gegenüber Zugkräften resistent. Die mittlere Säule ist meist bei Kompression, Zug und Translation betroffen, bei Extension und Rotation nur sehr selten; sie bildet die Übergangszone und ist die entscheidende anatomische Struktur bezüglich der operativen Stabilisierungsmethode. Ist sie nicht betroffen, so ist eine operative Stabilisierung meist nicht indiziert. Zur Stabilisierung nutzt McAfee die Harrington Distraktions- und Kompressions-Instrumente und die Luque-Stäbe, welche mittels sublaminären Cerclagen an den Wirbelkörpern befestigt werden.

1984 stellte Magerl (Magerl 1984) das „external spinal skeletal fixation (ESSF) system“ für traumatische Wirbelsäulenverletzungen des thorakolumbalen Übergangs vor. Über in die Pedikel eingebrachte Schanz-Schrauben wird ein externes Stabsystem befestigt. Dieser externe Fixateur bietet gegenüber den bis dato verwendeten Systemen die Vorteile, dass weniger Bewegungssegmente versteift werden müssen, dass er bei jeder Form von Instabilität eingesetzt werden kann und dass eine frühe Mobilisierung der Patienten ohne weitere externe Stützvorrichtungen möglich ist.

Die Ursprünge des heute gängigen Fixateur interne finden sich bei Dick und Kollegen (Dick 1984, Dick et al. 1985, Dick et al. 1985). Wie schon bei Magerl werden Schanz-Schrauben über die Pedikel in den Wirbelkörper eingebracht und mit einem internen Stabsystem verbunden. Hierbei ist es ausreichend, wenn das System in die dem frakturierten Wirbelkörper unmittelbar angrenzenden Wirbelkörper implantiert wird. Mithilfe der langen Hebelarme der Schanz-Schrauben lässt sich der Wirbelkörper in beliebige Richtungen reponieren. Der Fixateur interne kann auch nach Laminektomie oder bei Zerstörung der gesamten posterioren Anteile verwendet werden. Eine frühe Mobilisierung und das Tragen lediglich eines leichten Stützkorsetts für acht Wochen sind weitere Vorteile.

Der frühe Fixateur interne brachte allerdings noch einige Nachteile mit sich, z.B. die schwierige Befestigung der Muttern in dem tiefen Operationsfeld, die Behinderung von weiteren chirurgischen Schritten durch die eingebrachten Längsträger und die scharfen Kanten der abschließend gekürzten Schanz-Schrauben. Kluger et al. (Kluger und Gerner 1986) stellten daraufhin eine Weiterentwicklung des (Magerl-) Fixateur interne vor, bei dem die Schritte Reposition und Stabilisierung durch die Verwendung von aufsteckbaren Verlängerungsstäben für die Pedikelschrauben instrumentell voneinander getrennt sind. Diese können nach der Reposition wieder entfernt werden, sodass lediglich das für die Stabilisierung nötige Material in der Wunde verbleibt. Nach entsprechender Lagerung, Eröffnung des Operationsgebietes und Einbringung der Pedikelschrauben, der Verlängerungsstäbe und des Repositionsinstruments wird die Reposition über eine Reklinationsbewegung und dadurch verursachte initiale Verkürzung/Kompression der dorsalen Strukturen eingeleitet. Da sich die Reklinationsachse einige cm dorsal der anatomischen Reklinationsachse befindet, wird durch dieses Manöver primär eine Distraction der Wirbelkörper erreicht. Um beispielsweise bei einem Keilbruch eine ausreichende Aufrichtung der Wirbelkörperhinterkante und des hinteren Längsbandes zu erreichen müssen die Arme des Repositionsgerätes während des Reklinationsstresses einander angenähert werden. Nach einer Bildwandlerkontrolle wird das Repositionsergebnis über die Blockierung der Gelenke fixiert. Die Indikation für eine sekundäre Distraction wird in Abhängigkeit vom Ergebnis der Bildwandlerkontrolle gestellt. Anschließend folgen das Anpassen und dann das mediale Einbringen der stabilisierenden Längsträger (Kluger 1991). Dieses Operationsverfahren (Lordosierung/Distraction) wird auch heute noch angewandt und ist unter anderem Gegenstand dieser Arbeit.

Demgegenüber steht das Operationsverfahren Distraction/Lordosierung, welches auf die chirurgischen Empfehlungen der AOSpine (Vaccaro et al. 2014) zurückzuführen ist. Der Patient wird mit entsprechenden Polstern in Bauchlage gelagert, wodurch bereits eine geschlossene Teilreposition eingeleitet wird. Ober- und unterhalb des frakturierten Wirbelkörpers werden auf beiden Seiten Schanz-Schrauben über die Pedikel in den Wirbelkörper eingebracht. Die Position dieser wird mittels Bildwandler intraoperativ kontrolliert. Über auf den Schanz-Schrauben aufgebrachten Klemmbacken werden die Längsträger medial eingespannt und fixiert. Falls nötig (beispielsweise bei frakturierter Wirbelkörperhinterkante mit verlagerten Frakturteilen) erfolgt als nächstes die Dekompression. Anschließend erfolgt die Kyphosekorrektur bei fixierter dorsaler

Länge, indem die kranialen und kaudalen Schanz-Schrauben, jeweils auf beiden Seiten gleichzeitig, einander angenähert werden, die Klemmbacken aber fixiert sind. Eine Verkürzung der hinteren Säule ist dabei nicht möglich. Ist der erwünschte sagittale Grad erreicht, wird die Position der Schanz-Schrauben fixiert. Für die folgende Distraction, bei der die Schanz-Schrauben im Gegensatz zur „Kluger-Methode“ bereits am Längsträger befestigt und dadurch in ihrer kraniokaudalen Ausrichtung fixiert sind, wird die Verbindung von Klemmbacke und Längsträger gelockert, sodass die kranialen und kaudalen Schanz-Schrauben distrahiert werden können und somit eine Aufrichtung des Wirbelkörpers erreicht wird. Ist die Distraction ausreichend, werden die Klemmbacken fixiert. Nach abschließender Lagekontrolle des Fixateur interne mittels Bildwandler werden die Schanz-Schrauben gekürzt und die Wunde verschlossen.

Ergänzend ist noch zu erwähnen, dass bei einer instabilen ventralen Säule zusätzlich zur dorsalen Instrumentierung verschiedenste Wirbelkörperersatz-Verfahren zur Anwendung kommen müssen, da die alleinige dorsale Instrumentierung in diesen Fällen keine ausreichende Stabilität bietet. In der Regel wird ein solides oder expandierbares Wirbelkörperersatzsystem („cage“) zur Auffüllung des ventralen Defektes genutzt. Häufig erfolgt dieser Eingriff elektiv nachdem die dorsale Instrumentierung als notfallmäßige Primär-Versorgung durchgeführt wurde (Bühren und Josten 2013).

Des Weiteren werden die perkutanen Operationsverfahren in der Wirbelsäulenchirurgie zunehmend häufiger angewandt. Mit der perkutanen Pedikelschraubenfixierung sollen Weichteilverletzungen und die perioperative Morbidität verringert werden können. Eine Meta-Analyse von zwölf Studien mit insgesamt 279 perkutan und 340 offen fixierten Patienten konnte zeigen, dass mit dem perkutanen Verfahren signifikant kürzere Operationszeiten und Hospitalisierungszeiten sowie geringere Infektionsraten und ein besseres klinisches Outcome anhand der visuellen Analogskala erreicht wurden (Phan et al. 2015). Bei der Schraubenfehlage, dem postoperativem Cobb-Winkel, dem postoperativem Wirbelkörper-Winkel und der post-operativen anterioren Wirbelkörperhöhe konnte allerdings kein Unterschied zwischen den beiden Verfahren gefunden werden.

Insbesondere bei alten Menschen mit einer Osteoporose muss bei der Auswahl der passenden Operationstechnik auf die verringerte Knochenqualität der Wirbelkörper Rücksicht genommen werden. Um einer Auslockerung und/oder ein Durchschneiden der Schrauben entgegenzuwirken, sollten diese mittels Zementaugmentation

eingebraucht werden. Auch eine Vertebroplastie oder Kyphoplastie des frakturierten Wirbelkörpers ist empfehlenswert, um einem Versagen der vorderen Säule vorzubeugen (Spiegel et al. 2017).

3.5 Repositionsverlust nach der Behandlung

Die in den letzten Jahrzehnten stattgehabte Entwicklung der Behandlungsverfahren bei Wirbelsäulenverletzungen hat gezeigt, dass die verschiedensten Herangehensweisen oftmals nicht suffizient in der Versorgung dieser waren. Mit Versagen der Implantate kam es häufig zu einem Repositionsverlust mit erneut eintretender pathologischer Kyphosierung (Eysel und Meinig 1991, Lindsey und Dick 1991, Liljenqvist und Mommensen 1995, Wälchli et al. 2001, Katscher et al. 2003, Verlaan et al. 2004). Auch die aktuell verwendeten modernen Verfahren können einen langfristigen Repositionsverlust nicht gänzlich verhindern, wie die Arbeitsgemeinschaft „Wirbelsäule“ der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie in der groß angelegten internetbasierten Multicenterstudie zur operativen Behandlung traumatischer Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule feststellen konnte (Reinhold et al. 2009b). Zunächst wurde meist eine Korrektur der kyphotischen Fehlstellung erreicht, nach einem Follow-Up-Zeitraum von durchschnittlich 15 Monaten kam es dann aber, abhängig von Frakturlokalisation und verwendetem Verfahren (kombiniert dorsoventral, isoliert dorsal, isoliert ventral) zu unterschiedlich starken Repositionsverlusten (Mittelwerte im TLÜ zwischen 0.1° und 4°). Es zeigte sich weiterhin, dass die Frakturlokalisation, das Patientenalter und der präoperativ gemessene bGDW einen signifikanten Einfluss auf den bGDW zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung hatten. Nach einem durchschnittlichen Follow-Up-Zeitraum von nur 60 Tagen zeigte sich bei Spiegel und Kollegen (Spiegel et al. 2016) in ihrem Patientenkollektiv mit akuter instabiler Wirbelkörperfraktur (McCormack-Wert \geq fünf oder eine zusätzliche B-Komponente) und isolierter dorsaler Stabilisierung ein durchschnittlicher Repositionsverlust von $5.1^\circ (\pm 5.2^\circ)$.

4 Ziele der Arbeit

Im BG Klinikum Bergmannstrost Halle (Saale) lassen sich die Chirurgen der an der Akutversorgung von Wirbelsäulenverletzungen beteiligten Abteilungen in zwei verschiedene Schulen hinsichtlich der Operationstechnik bei Wirbelsäulenverletzungen einordnen: Distraction/Lordosierung = „AOSpine-Methode“ oder Lordosierung/Distraction = „Kluger-Methode“. Dieser Unterschied des operativen Vorgehens eröffnete die Möglichkeit, einen Vergleich hinsichtlich des initialen als auch des langfristigeren Repositionsergebnisses anzustellen. Die Vermutung, dass durch die initiale dorsale Verkürzung bei der Kluger-Methode eine bessere Lordosierung und dadurch eine bessere Reposition erreicht wird, sollte mit dieser Arbeit untersucht werden. Außerdem wurde der Zusammenhang zwischen dem Repositionsergebnis und zwei weit verbreiteten und häufig bei Wirbelsäulenverletzungen angewandten Scores geprüft. Die Untersuchung des Einflusses der Knochendichte auf den Repositionsverlust war ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Es wurden retrospektiv 1538 Patientenfälle die im BG Klinikum Bergmannstrost Halle (Saale) im Zeitraum vom 01.04.2001 bis 10.03.2016 mit einem Fixateur interne aufgrund einer Wirbelsäulenverletzung versorgt wurden analysiert und anhand des Operators einer der beiden OP-Gruppen zugeordnet, um anschließend die folgenden Hypothesen zu überprüfen:

1. Die OP-Gruppe „Kluger“ erreichte eine initial stärkere Reposition (= Lordosierung) als die OP-Gruppe „AOSpine“.
2. Der initial erreichte bGDW ist bei der OP-Gruppe „Kluger“ näher an dem als physiologisch angenommenen bGDW auf der jeweiligen Höhe als bei dem initial erreichten bGDW bei der OP-Gruppe „AOSpine“.
3. Der Repositionsverlust (= Verlust des initial eingestellten bGDW) über die Zeit ist bei der OP-Gruppe „Kluger“ geringer als bei der OP-Gruppe „AOSpine“.
4. Je höher der McCormack-Wert, desto stärker ist in beiden OP-Gruppen der Repositionsverlust über die Zeit.
5. Je höher der Grad der Instabilität laut AOSpine-Klassifikation, desto größer ist in beiden OP-Gruppen der Repositionsverlust über die Zeit.
6. Die Knochenqualität hat einen Einfluss auf den Repositionsverlust. In der Patientengruppe mit schlechter Knochenqualität kommt es zu einem größeren

Repositionsverlust als in den Patientengruppen mit guter oder abgeschwächter Knochenqualität.

5 Methodik

5.1 Patienten

Die Erhebung der Patientendaten erfolgte über das ORBIS Programm der Klinik. Von der Controlling-Abteilung des BG Klinikum Bergmannstrost Halle (Saale) wurde eine Liste mit den Fallnummern von all den Patienten angefordert, die im Zeitraum vom 01.01.2001 bis 10.03.2016 entweder den Operationen- und Prozedurenschlüssel (OPS) 5-83b.XX: „Osteosynthese (dynamische Stabilisierung) an der Wirbelsäule durch Schrauben-Stab-System“ (50 = ein Segment, 51 = zwei Segmente, 52 = drei Segmente, 53 = vier oder mehr Segmente) oder den „International Classification of Diseases, 10. Revision, German Modification“ (ICD-10-GM) Code S22.XX: „Fraktur eines Brustwirbels“ (00 = Höhe nicht näher bezeichnet, 01 = Thorakalwirbel (T) 1 und T 2, 02 = T 3 und T 4, 03 = T 5 und T 6, 04 = T 7 und T 8, 05 = T 9 und T 10, 06 = T 11 und T 12 und S22.1 = Multiple Frakturen der Brustwirbelsäule) oder S32.XX: „Fraktur eines Lendenwirbels“ (00 = Höhe nicht näher bezeichnet, 01 = Lumbalwirbel (L) 1, 02 = L 2, 03 = L 3, 04 = L 4, 05 = L 5) im OP-Protokoll stehen hatten.

Es wurden Follow-Up-Zeiträume mit einer fest definierten Dauer festgelegt, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Patientendaten zu erreichen: T1–T2: sieben Tage; T1–T3: 14 Tage; T1–T4: 183 Tage (T1 = Unfallzeitpunkt, T2 = intra-OP, T3 = post-OP, T4 = Follow-Up 1. OP). Nicht alle Patienten aus der Gesamtstichprobe hatten zu jedem Zeitpunkt ein Follow-Up. Dies traf lediglich für 170 Patienten zu, sodass diese eine kleinere Teilstichprobe bildeten, welche für die Beantwortung der Hypothesen 3 bis 6 herangezogen wurde.

Zum Zeitpunkt des Unfalls betrug das mittlere Alter der Patienten der Gesamtstichprobe (N = 620) 49.83 Jahre (Md = 50 Jahre) und der Männeranteil lag bei 62.7%, der Frauenanteil bei 37.3%. Die Patienten der Teilstichprobe (N = 170) waren im Mittel 53.38 Jahre (Md = 56 Jahre) alt und zu 57.6% männlich bzw. zu 42.4% weiblich. Aus der Abbildung 1 (siehe S. 27) lässt sich die Stichprobenziehung nachverfolgen.

5.1.1 Einschlusskriterien

In einem ersten Schritt wurde jede einzelne Fallnummer im ORBIS Programm überprüft und in die Stichprobe eingeschlossen, wenn: ein bisegmentaler Fixateur interne implantiert wurde, der frakturierte Wirbelkörper auf Höhe BWK 10 bis LWK 5 lag (bei mehreren Wirbelverletzungen wurde nur der am stärksten verletzte Wirbel

berücksichtigt), es mindestens ein qualitativ gutes Prä-Fixateur-OP CT-Bild sowie mindestens zwei qualitativ gute Post-Fixateur-OP-Röntgen- oder CT-Bilder gab (eins davon musste maximal 14 Tage nach der OP aufgenommen worden sein) und die Fixateur interne OP innerhalb von sieben Tagen ab dem Unfalldatum durchgeführt wurde. Als qualitativ ausreichend wurden die radiologischen Befunde gewertet, wenn die Deck- und Grundplatten der interessierenden Wirbelkörper deutlich genug erkennbar waren und eine Winkelmessung zuließen.

5.2 Methoden

5.2.1 Datenerhebung und -verarbeitung

Es wurde das Geburtsdatum, der Unfalltag und der verletzte Wirbelkörper in einer Excel-Tabelle notiert. In der Regel stimmte der Unfalltag mit dem Tag der Aufnahme in die Klinik überein. Wenn es sich um eine Verlegung aus einem auswärtigen Krankenhaus handelte und der genaue Unfalltag anhand der zur Verfügung stehenden Daten, wie zum Beispiel Arztbriefen, nicht genau erfasst werden konnte, wurde entweder der Aufnahmetag ins Bergmannstrost oder das Datum des ersten radiologischen Befundes als Unfalltag gewertet. Für die Bestimmung und die Klassifizierung des verletzten Wirbelkörpers wurden Nativ-Röntgen- und CT-Bilder verwendet. Da in manchen Fällen mehrere Wirbelfrakturen vorlagen, wurden auch die Post-Fixateur-OP-Bilder zur Bestimmung des relevanten Wirbelkörpers herangezogen. Die digitalen radiologischen Aufnahmen wurden über das in der Klinik genutzte Programm AGFA Impax6 aufgerufen und ausgemessen. Im Prä-OP-Bild sowie in allen verfügbaren und verwertbaren Post-OP-Bildern wurde die lokale Kyphose mit dem sagittalen Cobb Winkel bestimmt, welcher dem °GDW entspricht. Dafür wurde, wie von Verheyden und Kollegen (Verheyden et al. 2011) empfohlen, eine Gerade durch die Deckplatte des oberhalb des frakturierten Wirbelkörpers gelegenen Wirbelkörper und eine Gerade durch die Bodenplatte des unterhalb des frakturierten Wirbelkörpers gelegenen Wirbelkörper gezogen und der Winkel zwischen diesen beiden Geraden bestimmt. Nachkommastellen wurden auf- bzw. abgerundet. Kyphotische Winkel wurden als negative Werte erfasst, lordotische Winkel als positive.

Für die Bestimmung der Knochendichte mittels Hounsfield Units (HU) wurde das axiale prä-OP-CT-Bild oder, falls es so eines nicht gab, ein axiales post-OP-CT-Bild, welches nicht älter als ein Jahr war, verwendet. Der individuelle HU-Wert ergab sich aus dem Mittel von sechs HU-Messungen, drei in dem Wirbelkörper oberhalb und drei in dem

Wirbelkörper unterhalb des frakturierten Wirbelkörpers. Angelehnt an das Vorgehen von Schreiber et al. (Schreiber et al. 2011) wurde pro Wirbelkörper eine Messung knapp unter der Deckplatte, eine Messung knapp oberhalb der Grundplatte und eine Messung ungefähr in der Mitte des Wirbelkörpers durchgeführt. Jede dieser Messungen umfasste einen möglichst großen ovalen Bereich der jeweiligen axialen Schnittebene des Wirbelkörpers, ohne dass Anteile der Kortikalis mit eingeschlossen waren. Die Normwerte von Schreiber und Kollegen zeigen, dass Frauen und Männer in den ersten Lebensdekaden (20. bis 49. Lebensjahr) durchschnittliche HU-Werte von ca. 180 bis 250 und in den letzten (70. bis 89. Lebensjahr) durchschnittliche HU-Werte von ca. 70 bis 90 haben. Zudem konnten Pickhardt und Kollegen (Pickhardt et al. 2013) in ihrer Studie mit 1867 Patienten nachweisen, dass ein mittels CT ermittelter HU-Grenzwert von 160 zu 90% sensitiv und ein HU-Grenzwert von 110 zu mehr als 90% spezifisch für die Unterscheidung zwischen Osteoporose, Osteopenie und normaler Knochenmineraldichte ist. Aufgrund dieser Daten erfolgte hier eine Einteilung in drei HU-Gruppen: schlechte Knochenqualität = $HU < 110$, verringerte Knochenqualität = HU zwischen 110-180 und gute Knochenqualität = $HU > 180$. Abschließend wurde aus dem OP-Protokoll der Operateur erfasst. Am Ende der gesamten Datenerhebung wurden alle Operateure entsprechend ihrer OP-Technik einer der beiden OP-Gruppen zugeordnet (die Zuordnung erfolgte durch den leitenden Arzt der Wirbelsäulengruppe des Klinikums).

5.2.2 Physiologische bGDW -Referenzwerte

Um Referenzwerte im Sinne einer physiologischen Norm für die Kyphose- bzw. Lordosewinkel der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte zu haben, wurden im Rahmen dieser Arbeit hypothetische Normwerte erstellt (siehe Tabelle 1). Roussouly und Kollegen (Roussouly et al. 2005) fanden in ihrer Stichprobe einen durchschnittliche Lendenlordose von 61.43° , wovon sich in der Regel ungefähr zwei Drittel auf den unteren Bogen (LWK 4 bis Sakralwirbelkörper (SWK) 1) und ungefähr ein Drittel auf den oberen Bogen (LWK 1 bis LWK 3) verteilen (Barrey et al. 2013). Anhand dieser Angaben wurden als erstes die monosegmentalen Normwerte für die Lendenlordose gebildet. Die monosegmentalen Werte für die unteren drei BWK spiegeln die von unten nach oben langsam zunehmende kyphotische Form der Brustwirbelsäule wieder. Daraus wurden dann die bisegmentalen physiologischen Normwerte gebildet, welche als Referenzwerte für die Beantwortung der zweiten Hypothese verwendet wurden.

Tabelle 1: Eigens erstellte physiologische Referenzwerte des thorakolumbalen Übergangs und der Lendenwirbelsäule; negative bzw. positive Werte entsprechen kyphotischen bzw. lordotischen Winkeln.

bisegmentales Segment	physiologischer αGDW
BWK 9/BWK 11	-5°
BWK 10/BWK 12	-2°
BWK 11/LWK 1	2°
BWK 12/LWK 2	7°
LWK 1/LWK 3	10°
LWK 2/LWK 4	15°
LWK 3/LWK 5	25°
LWK 4/SWK 1	40°

5.2.3 AOSpine-Klassifikation, McCormack Score

Die Klassifizierung nach McCormack und AOSpine wurde nur an den verfügbaren prä-OP-CT-Bildern vorgenommen.

Die Einteilung der Wirbelsäulenverletzung gemäß der AOSpine-Klassifikation (Vacaro et al. 2013) erfolgte nach den im folgenden Abschnitt beschriebenen Vorgaben. Eine A-Fraktur lag vor, wenn es sich um eine Kompressionsfraktur handelte. Es wurde unterschieden in: A1 = Keil-/Impaktionsbrüche, A2 = Spalt- oder Kneifzangenbrüche, A3 = Inkomplette Berstungsbrüche, A4 = Komplette Berstungsbrüche. Der Frakturtyp A0 war nicht vertreten, da dieser durch Dorn- oder Querfortsatzfrakturen und keinerlei Instabilität der Wirbelsäule gekennzeichnet ist und somit keine chirurgische Therapie benötigt. War der Verletzungsmechanismus eine Distraction, wurde eine B-Fraktur klassifiziert: B1 = Transligamentäre Flexions-Distraktions-Verletzung, B2 = Transossäre Flexions-Distraktions-Verletzung, B3 = Hyperextensions-Verletzung. Eine totale Zerreißung der Wirbelsäule bzw. eine Rotationsverletzung wurde als C-Fraktur klassifiziert.

Für die Erhebung des McCormack-Wertes (McCormack et al. 1994) wurde ein CT-Bild herangezogen. Zur Beurteilung des Ausmaßes der Zerstörung des betroffenen Wirbelkörpers wurden sagittale Schnittbilder verwendet. Es wurde ein Punkt vergeben, wenn

weniger als ca. 30%, zwei Punkte, wenn zwischen 30% und 60% und drei Punkte, wenn mehr als 60% des Wirbelkörpers frakturiert waren. Für die Beurteilung der Verlagerung der Frakturteile wurden axiale Schnittbilder verwendet. Bei einer Verlagerung von 0 bis 1 mm wurde ein Punkt vergeben; betrug die Verlagerung bei weniger als der Hälfte der im Querschnitt sichtbaren Frakturteile mindestens 2 mm wurden zwei Punkte vergeben; betraf dies mehr als die Hälfte der im Querschnitt sichtbaren Frakturteile wurden drei Punkte vergeben. Die Beurteilung der Korrektur der kyphotischen Stellung konnte erst nach der Winkelmessung im Prä- und Post-OP Bild durchgeführt werden. Betrug die Korrektur 0-3° wurde ein Punkt vergeben, bei 4-9° zwei Punkte und bei 10° oder mehr drei Punkte.

5.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit Excel 2016, Version 16.0 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) und SPSS 17.0 (SPSS®, Inc., Chicago, USA) für Windows vorgenommen.

Zur Beantwortung der Hypothesen 1 und 2 wurden ungepaarte t-Tests berechnet. Der t-Test gilt als robust gegenüber der Verletzung seiner Voraussetzungen, sofern die beiden Stichproben ungefähr gleich groß bzw. nicht kleiner als $N = 30$ sind (Rasch 2008).

Eine ANOVA mit Messwiederholung (repeated measurement ANOVA, rmANOVA) wurde zur Beantwortung der Hypothese 3 durchgeführt. Die abhängige Variable war der Repositionsverlust zwischen T1 und T2 und es wurden die Haupteffekte Zeitpunkt und OP-Verfahren geprüft. Zur Prüfung der Hypothese 6 wurde eine einfaktorielle ANOVA gerechnet, wobei der Repositionsverlust über ein halbes Jahr die abhängige Variable war und der Haupteffekt der HU-Gruppen untersucht wurde. Bei beiden Hypothesen wurde das Ergebnis als Teststatistik F angegeben.

Um die Hypothesen 4 und 5 zu prüfen wurde der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient (r_s) berechnet.

Das Signifikanzniveau wurde auf $p = 0.05$ festgelegt. Die Effektstärken werden als Cohen's d (Cohen 2013), bei der ANOVA als partielles Eta Quadrat (η_p^2) angegeben.

6 Ergebnisse

6.1 Deskriptive Daten der Gesamtstichprobe

6.1.1 Patientenkollektiv

Von 1538 untersuchten Fallnummern und 3288 (von T1 bis T8) analysierten Röntgen- und CT-Bildern konnten nach Anwendung der oben genannten Einschlusskriterien 620 Patienten (40.3%) in die Gesamtstichprobe eingeschlossen werden. Der mittlere Follow-Up-Zeitraum für den in dieser Arbeit berücksichtigten Zeitraum von T1 bis T4 betrug 115 Tage (range: 3 bis 1984 Tage). Manche Patienten hatten darüber hinaus noch weitere, also nach dem Zeitpunkt T4 = 183 Tage nach dem Unfall, aufgenommene Follow-Up-Bilder, sodass sich unter Berücksichtigung dieser Fälle ein mittlerer Follow-Up-Zeitraum von 437 Tagen (range: 50 bis 4798 Tage) ergab. In der AOSpine-Gruppe lag der Männeranteil bei 60.2% (N = 271) und der Frauenanteil bei 39.8% (N = 179). In der Kluger-Gruppe betrug der Männeranteil 69.4% (N = 118) und der Frauenanteil 30.6% (N = 52). Eine Übersicht der Stichprobenziehung bzw. der verfügbaren Daten zu den einzelnen Zeitpunkten ist in Abbildung 1 dargestellt.

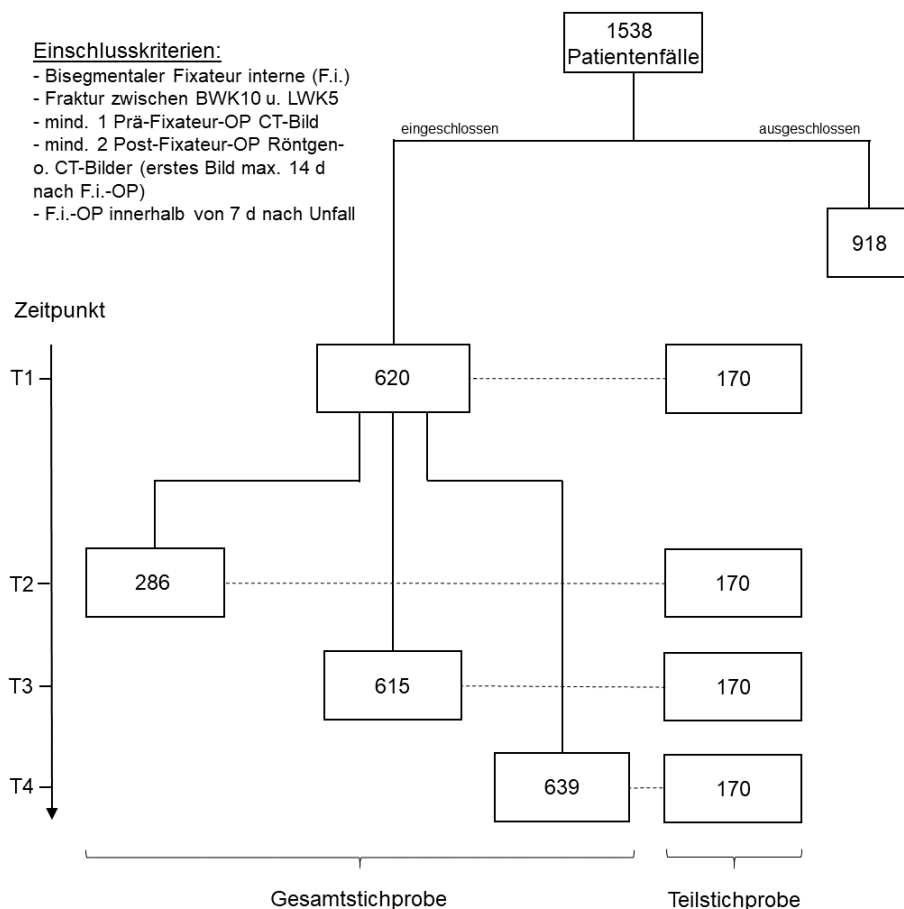


Abbildung 1: Dendrogramm zur Veranschaulichung der Stichprobenziehung und der Aufteilung in Gesamt- und Teilstichprobe.

6.1.2 Veränderung der $bGDW$ über die Zeit

Einen Überblick über die mittleren $bGDW$ beider OP-Gruppen zu den untersuchten Zeitpunkten ist in Abbildung 2 dargestellt. Der mittlere $bGDW$ zum Zeitpunkt T1 war bei der Gesamtstichprobe -7° , bei der AOSpine-Gruppe -7° und bei der Kluger-Gruppe -8° . Zum Zeitpunkt T2 betrug der mittlere $bGDW$ der Gesamtstichprobe 4° (mittleres Follow-Up von 3 Tagen), der AOSpine-Gruppe 3° (mittleres Follow-Up von 3 Tagen) und der Kluger-Gruppe 7° (mittleres Follow-Up von 1 Tag). Zum Zeitpunkt T3 zeigte sich in der Gesamtstichprobe ein mittlerer $bGDW$ von 2° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen), in der AOSpine-Gruppe von 2° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen) und in der Kluger-Gruppe von 3° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen). Zum Zeitpunkt T4 lag der mittlere $bGDW$ der Gesamtstichprobe bei -3° (mittleres Follow-Up von 110 Tagen), die der AOSpine-Gruppe bei -3° (mittleres Follow-Up von 110 Tagen) und bei der Kluger-Gruppe bei -3° (mittleres Follow-Up von 110 Tagen).

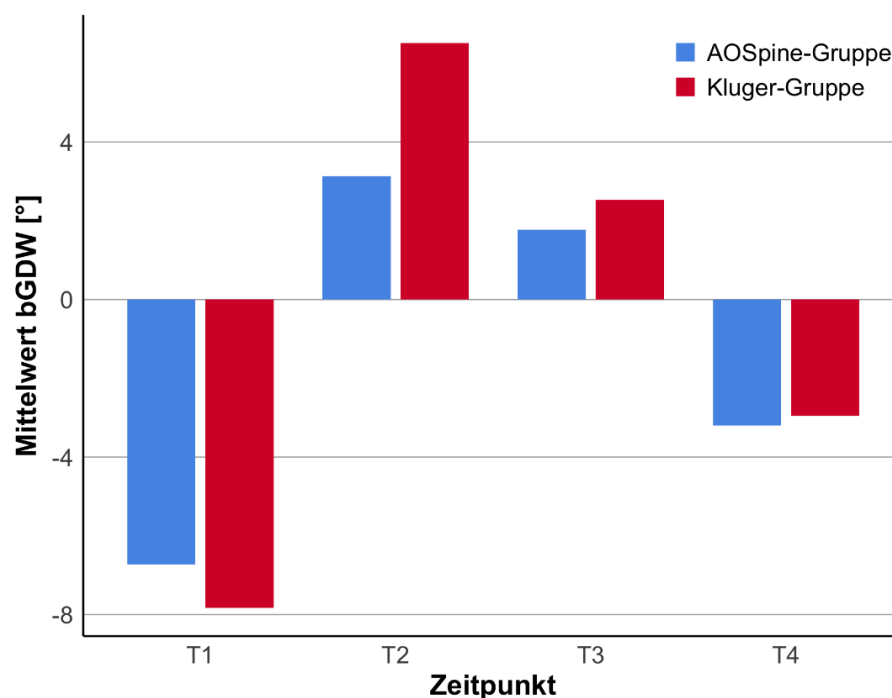


Abbildung 2: Veränderung der mittleren $bGDW$ über die Zeit (T1 bis T4) in der Gesamtstichprobe.

6.1.3 Lokalisation der Wirbelsäulenverletzung

Mit 39.0% (N = 242) war der LWK 1 in der Gesamtstichprobe und in den beiden OP-Gruppen der am häufigsten frakturierte Wirbel. Es folgen der BWK 12 mit 23.4% (N = 145) und der LWK 2 mit 14.2% (N = 88). Die restlichen Wirbelkörper waren mit jeweils weniger als 10% betroffen (Abbildung 3). In der OP-Gruppe „AOSpine“

verteilt sich die Häufigkeiten der Frakturen wie folgt: Der LWK 1 war mit 40.9% (N = 184) ebenfalls am häufigsten, der BWK 12 mit 22.7% (N = 102) am zweit- und der LWK 2 mit 13.3% (N = 60) am dritthäufigsten betroffen. Eine ähnliche Verteilung zeigte sich in der OP-Gruppe „Kluger“. Hier war der LWK 1 zu 34.1% (N = 58), der BWK 12 zu 25.3% (N = 43) und der LWK 2 zu 16.5% (N = 28) betroffen. In beiden Gruppen waren die übrigen Wirbelkörper zu weniger als 10% betroffen. Einen Überblick über die Verteilung in den OP-Gruppen gibt Abbildung 4.

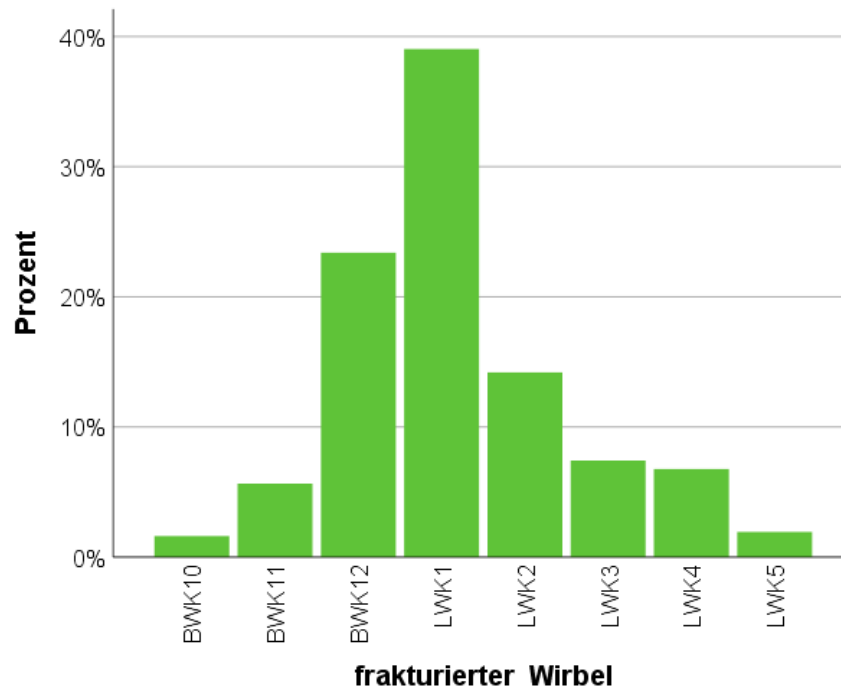


Abbildung 3: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in der Gesamtstichprobe.

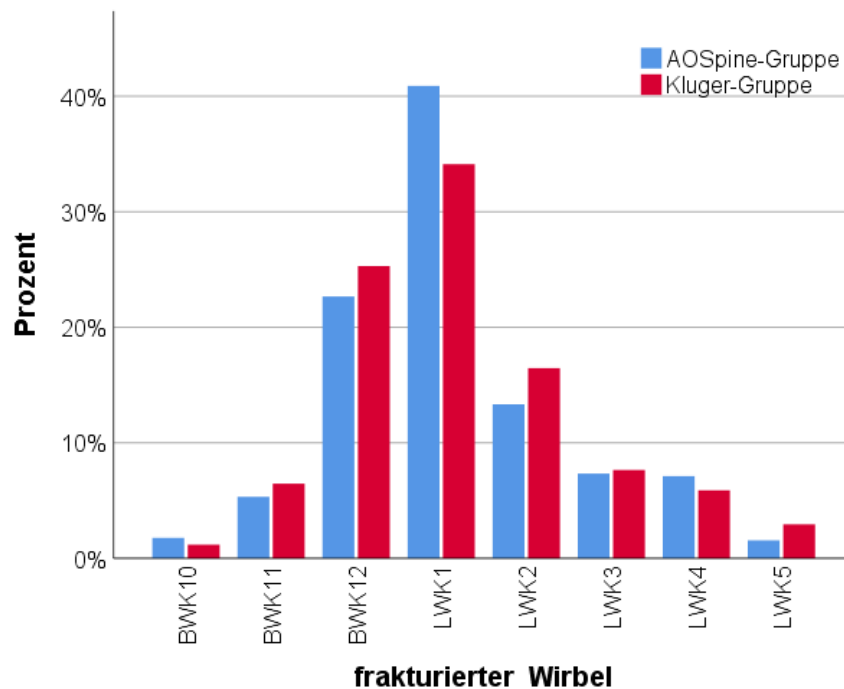


Abbildung 4: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in den OP-Gruppen in der Gesamtstichprobe.

6.1.4 Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen

In der Gesamtstichprobe hatten mit 45.3% (N = 281) und somit die meisten Patienten eine A4-Fraktur. Gut ein Drittel der Patienten hatte eine A3-Fraktur (30.3%, N = 188). Die schwerste Fraktur nach der AOSpine-Klassifikation wurde in der Gesamtstichprobe bei 24 Patienten (3.9%) erfasst (Abbildung 5). In der AOSpine-Gruppe war die A4-Fraktur mit 41.1% (N = 185) am häufigsten vertreten. Danach folgt die A3-Fraktur mit 33.6% (N = 151) und die A1-Fraktur mit 6.9% (N = 31). Die schwerste Fraktur war in dieser Gruppe die C-Fraktur mit 2.7% (N = 12). Mit 55.9% (N = 95) war die A4-Fraktur in der Kluger-Gruppe am häufigsten. Die A3-Fraktur mit 21.8% (N = 37) war die zweithäufigste und die C-Fraktur mit 7.1% (N = 12) die dritthäufigste und auch die schwerste Fraktur in der Kluger-Gruppe (Abbildung 6).

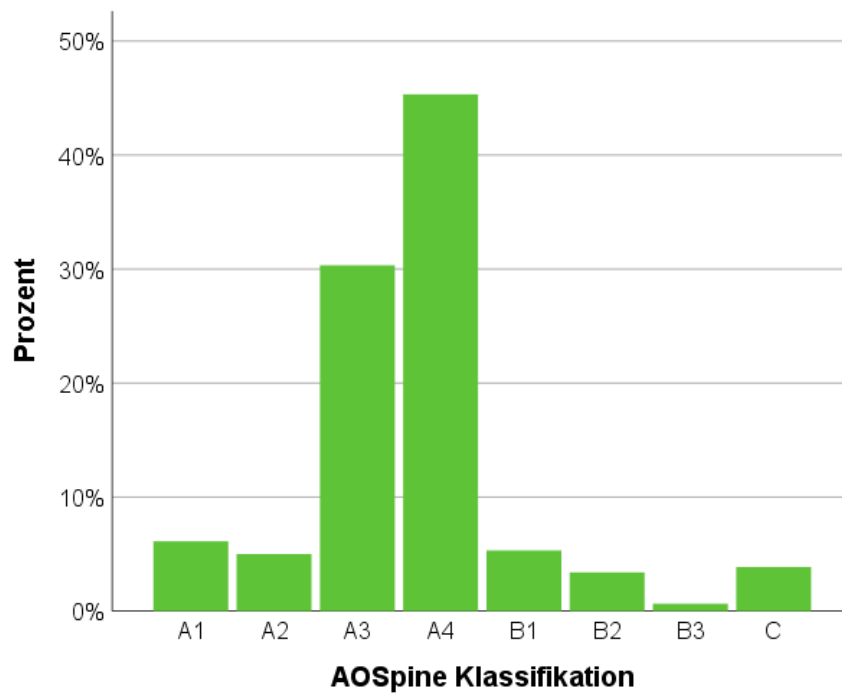


Abbildung 5: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Gesamtstichprobe.

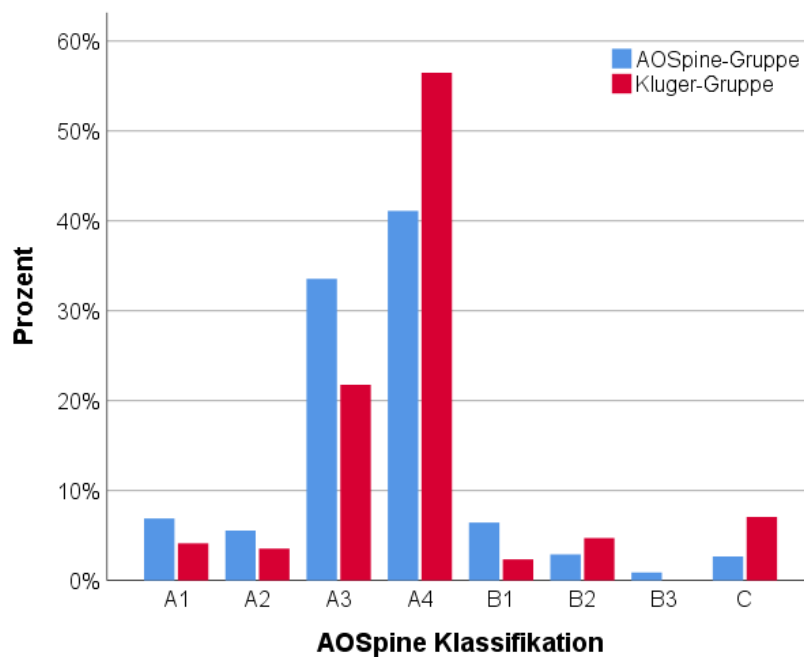


Abbildung 6: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen in der Gesamtstichprobe.

6.1.5 Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen

In der Gesamtstichprobe war ein McCormack-Wert von sechs Punkten (28.2%, N = 175) am häufigsten, gut ein Viertel der Patienten hatte einen Wert von sieben Punkten (23.7%, N = 147) (Abbildung 7). In der AOSpine-Gruppe betrug der am häufigsten erreichte McCormack-Wert sechs Punkte (30.7%, N = 138), am zweithäufigsten war ein Wert von sieben Punkten (24%, N = 108). Der am häufigsten erreichte McCormack-Wert lag in der Kluger-Gruppe bei sieben Punkten (22.9%, N = 39), der zweithäufigste bei sechs Punkten (21.8%, N = 37) (Abbildung 8).

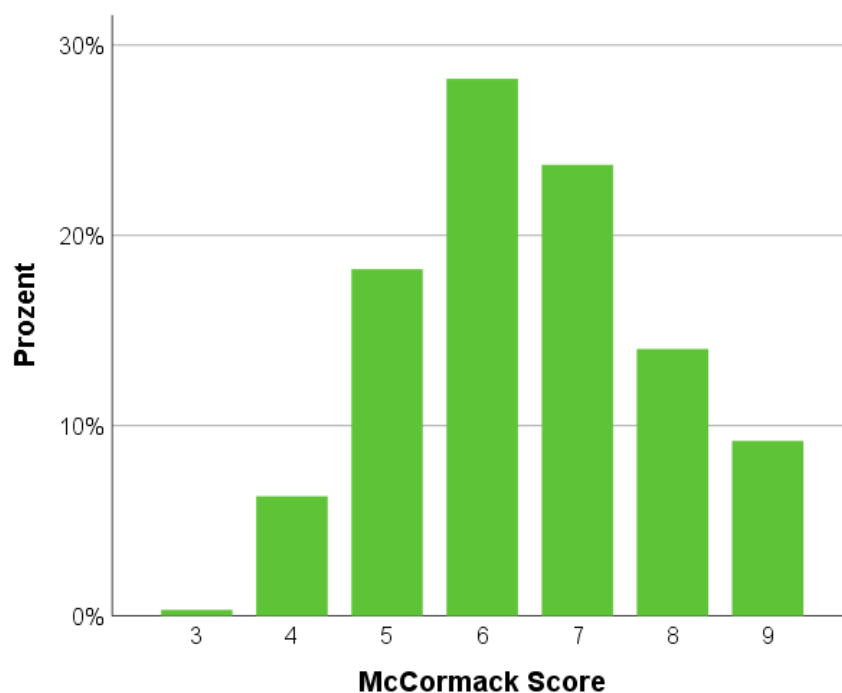


Abbildung 7: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Gesamtstichprobe.

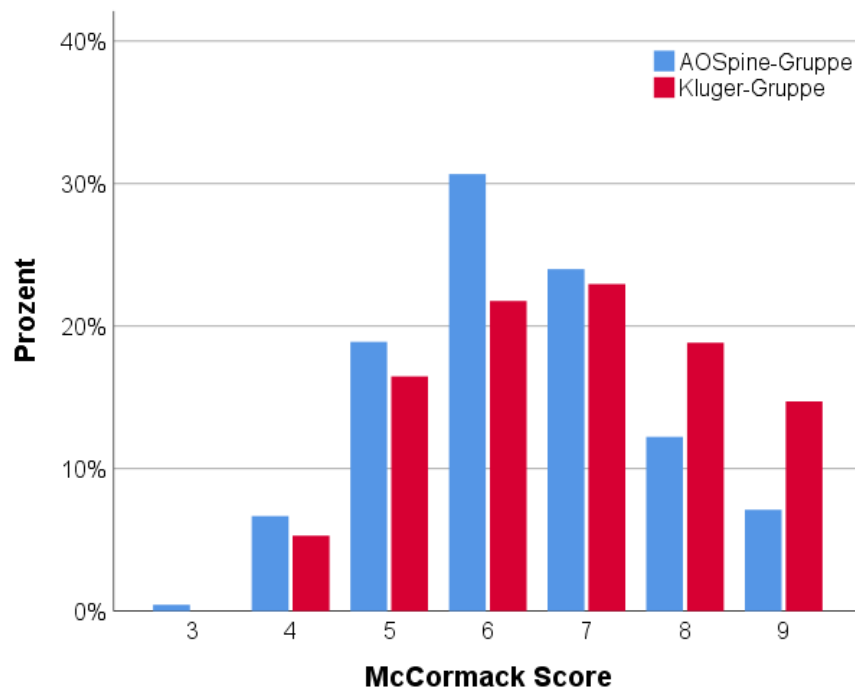


Abbildung 8: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen der Gesamtstichprobe.

6.1.6 Häufigkeiten der HU-Gruppen

Gut die Hälfte aller Patienten der Gesamtstichprobe hatte eine verringerte Knochenqualität (45%, N = 279) und jeweils ungefähr ein Viertel der Patienten hatte eine gute (29.7%, N = 184) oder eine schlechte Knochenqualität (25.3%, N = 157). In der AOSpine-Gruppe war auch eine verringerte Knochenqualität am häufigsten (47.3%, N = 213), eine schlechte bzw. gute Knochenqualität kam zu 24.2% (N = 109) bzw. 28.4% (N = 128) vor. Für die Kluger-Gruppe ergab sich eine Verteilung von 38.8% (N = 66) für eine verringerte, 32.9% (N = 56) für eine gute und 28.2% (N = 48) für eine schlechte Knochenqualität (Tabelle 2).

Tabelle 2: Häufigkeiten der HU-Gruppen in der Gesamtstichprobe und in den OP-Gruppen.

	Gesamtstichprobe	AOSpine-Gruppe	Kluger-Gruppe
schlechte Knochenqualität (HU < 110)	25.3% (N = 157)	24.2% (N = 109)	28.2% (N = 48)
verringerte Knochenqualität (HU zwischen 110-180)	45% (N = 279)	47.3% (N = 213)	38.8% (N = 66)
gute Knochenqualität (HU > 180)	29.7% (N = 184)	28.4% (N = 128)	32.9% (N = 56)

6.2 Deskriptive Daten der Teilstichprobe

6.2.1 Patientenkollektiv

Zur Beantwortung der Hypothesen 3 bis 6 wurde aus den Fällen, die zu jedem Zeitpunkt von T1-T4 ein Follow-Up hatten, eine Teilstichprobe gebildet. In dieser kann 81.8% (N = 139) der Patienten der AOSpine-Gruppe und 18.2% (N = 31) der Patienten der Kluger-Gruppe zugeordnet werden. Der mittlere Follow-Up-Zeitraum betrug 62 Tage (range: 4 bis 172 Tage). In der AOSpine-Gruppe gab es einen Männeranteil von 57.6% (N = 80) und einen Frauenanteil von 42.4% (N = 59), in der Kluger-Gruppe betrug der Männeranteil 58.1% (N = 18) und der Frauenanteil 41.9% (N = 13).

6.2.2 Veränderung der ${}_b\text{GDW}$ über die Zeit

Einen Überblick über die ${}_b\text{GDW}$ beider OP-Gruppen zu den vier Zeitpunkten in der Teilstichprobe gibt Abbildung 9. Der mittlere ${}_b\text{GDW}$ zum Zeitpunkt T1 war bei der Teilstichprobe -7° , bei der AOSpine-Gruppe -8° und bei der Kluger-Gruppe -2° . Zum Zeitpunkt T2 betrug der mittlere ${}_b\text{GDW}$ der Teilstichprobe 5° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen), der AOSpine-Gruppe 3° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen) und der Kluger-Gruppe 11° (mittleres Follow-Up von 1 Tag). Zum Zeitpunkt T3 zeigte sich in der Teilstichprobe ein mittlerer ${}_b\text{GDW}$ von 2° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen), in der AOSpine-Gruppe von 0° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen) und in der Kluger-Gruppe von 8° (mittleres Follow-Up von 2 Tagen). Zum Zeitpunkt T4 lag der mittlere ${}_b\text{GDW}$ der Teilstichprobe bei -3° (mittleres Follow-Up von 58 Tagen), die der AOSpine-Gruppe bei -4° (mittleres Follow-Up von 61 Tagen) und bei der Kluger-Gruppe bei 3° (mittleres Follow-Up von 44 Tagen).

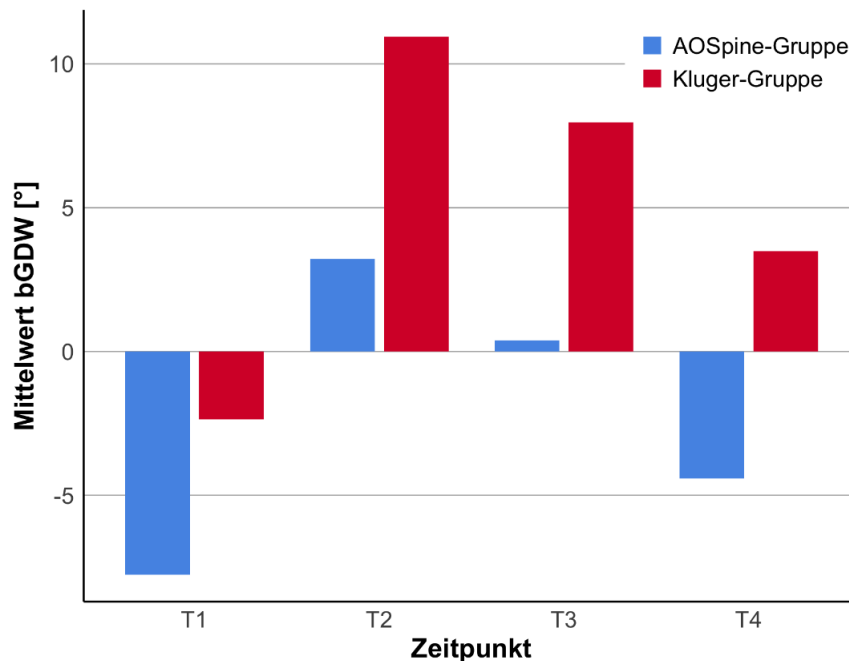


Abbildung 9: Veränderung der mittleren $bGDW$ über die Zeit (T1 bis T4) in der Teilstichprobe.

6.2.3 Lokalisation der Wirbelsäulenverletzung

Mit 48.8% (N = 83) war der LWK 1 in der Teilstichprobe am häufigsten frakturiert. Es folgen der BWK 12 mit 21.8% (N = 37) und der LWK 2 mit 14.7% (N = 25). Die restlichen Wirbelkörper waren mit jeweils weniger als 10% betroffen (Abbildung 10). In der OP-Gruppe „AOSpine“ verteilten sich die Häufigkeiten der Frakturen wie folgt: Der LWK 1 war mit 47.5% (N = 66) ebenfalls am häufigsten, der BWK 12 mit 25.2% (N = 35) am zweithäufigsten und der LWK 2 mit 13.7% (N = 19) am dritthäufigsten betroffen. Eine andere Verteilung zeigte sich in der OP-Gruppe „Kluger“. Hier war der LWK 1 zu 54.8% (N = 17) auch am häufigsten, der LWK 2 zu 19.4% (N = 6) allerdings am zweithäufigsten betroffen. In beiden Gruppen waren die übrigen Wirbelkörper zu weniger als 10% betroffen (Abbildung 11).

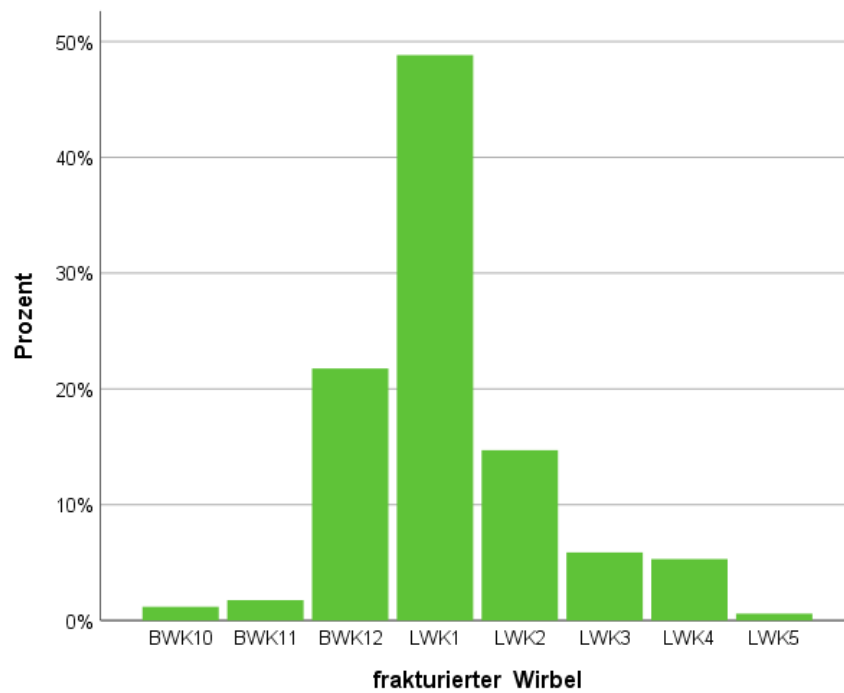


Abbildung 10: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in der Teilstichprobe.

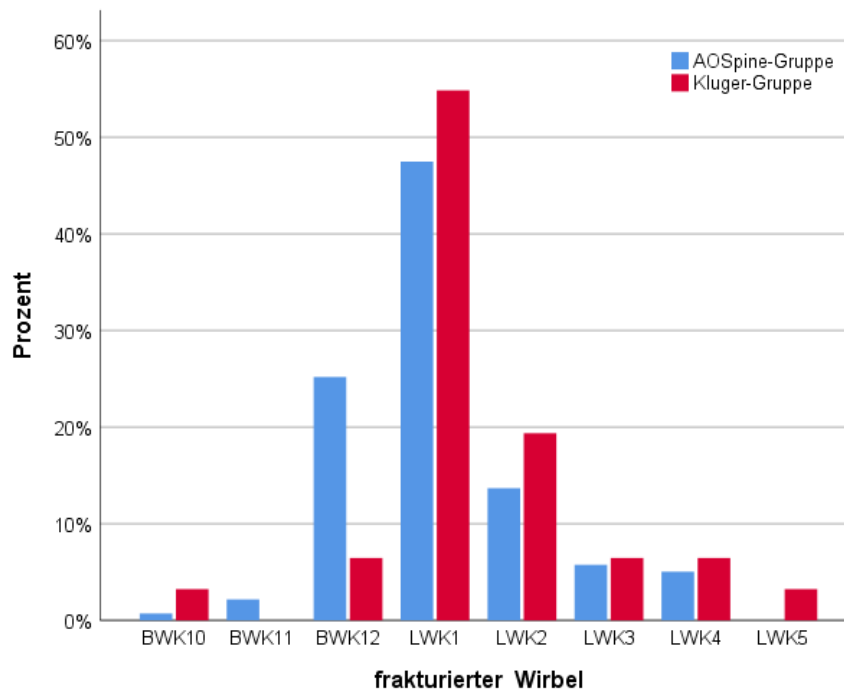


Abbildung 11: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in den OP-Gruppen in der Teilstichprobe.

6.2.4 Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen

In der Teilstichprobe hatten mit 54.1% (N = 92) ebenfalls die meisten Patienten eine A4-Fraktur. Gut ein Viertel der Patienten hatte eine A3-Fraktur (23.5%, N = 40). Die schwerste Fraktur nach der AOSpine-Klassifikation wurde in der Teilstichprobe bei 2 Patienten (1.2%) erfasst (Abbildung 12). In der AOSpine-Gruppe war die A4-Fraktur mit 49.6% (N = 69) am häufigsten vertreten. Danach folgt die A3-Fraktur mit 26.6% (N = 37) und die B1-Fraktur mit 8.6% (N = 12). Die schwerste Fraktur war in dieser Gruppe die C-Fraktur mit 0.7% (N = 1). Mit 74.2% (N = 23) war die A4-Fraktur in der Kluger-Gruppe am häufigsten. Die A3-Fraktur mit 9.7% (N = 3) war die zweithäufigste und die B2-Fraktur mit 6.5% (N = 2) die dritthäufigste und die C-Fraktur mit 3.2% (N = 1) die schwerste Fraktur in der Kluger-Gruppe (Abbildung 13).

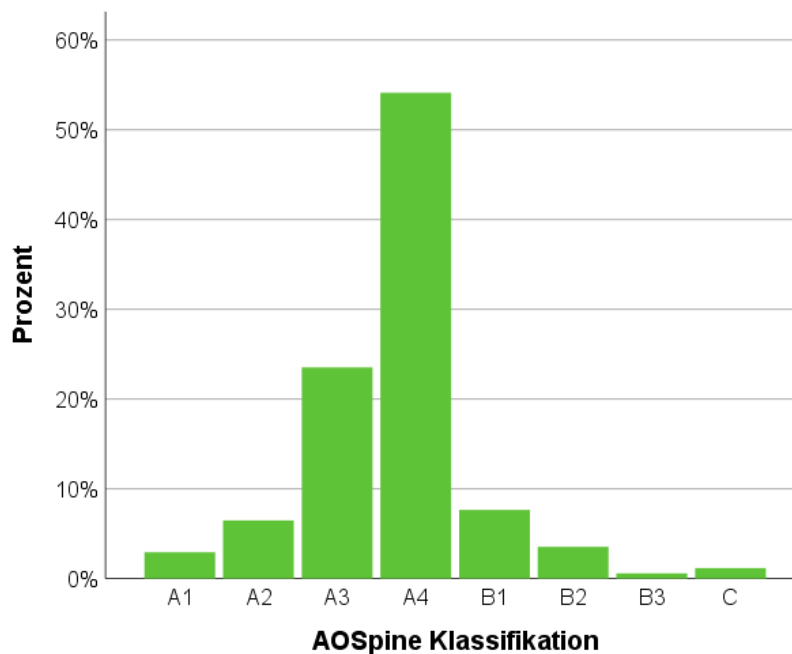


Abbildung 12: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Teilstichprobe.

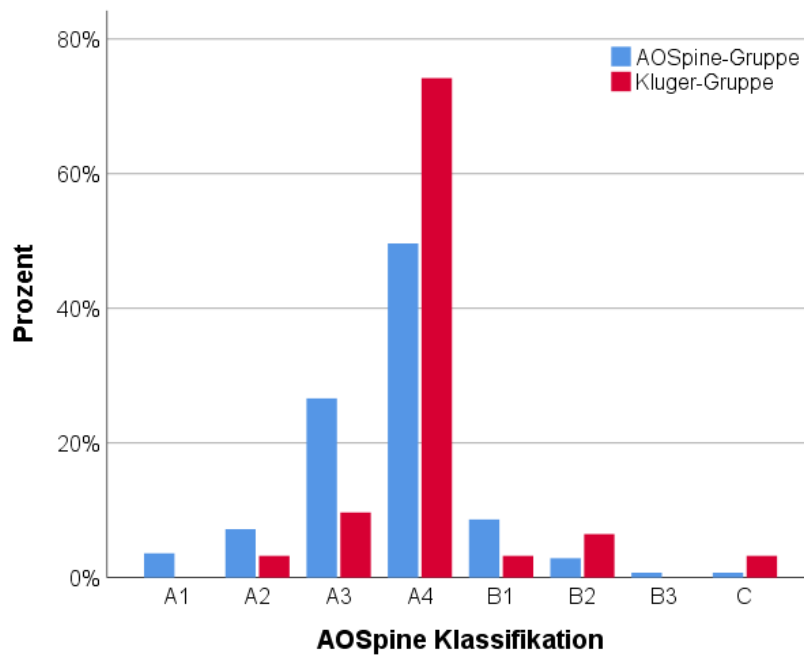


Abbildung 13: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen in der Teilstichprobe.

6.2.5 Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen

In der Teilstichprobe war ein McCormack-Wert von sechs Punkten (27.6%, N = 47) am häufigsten. 22.9% (N = 39) der Patienten hatte sieben Punkte, 18.8% (N = 32) hatte fünf Punkte und 17.1% (N = 29) hatte acht Punkte. Die restlichen McCormack-Werte waren mit weniger als 10% vertreten (Abbildung 14). In der AOSpine-Gruppe betrug der am häufigsten erreichte McCormack-Wert sechs Punkte (27.3%, N = 38), am zweithäufigsten war ein Wert von sieben Punkten (23.7%, N = 33). Der am häufigsten erreichte McCormack-Wert lag in der Kluger-Gruppe bei sechs Punkten (29%, N = 9), der zweithäufigste bei acht Punkten (22.6%, N = 7) (Abbildung 15).

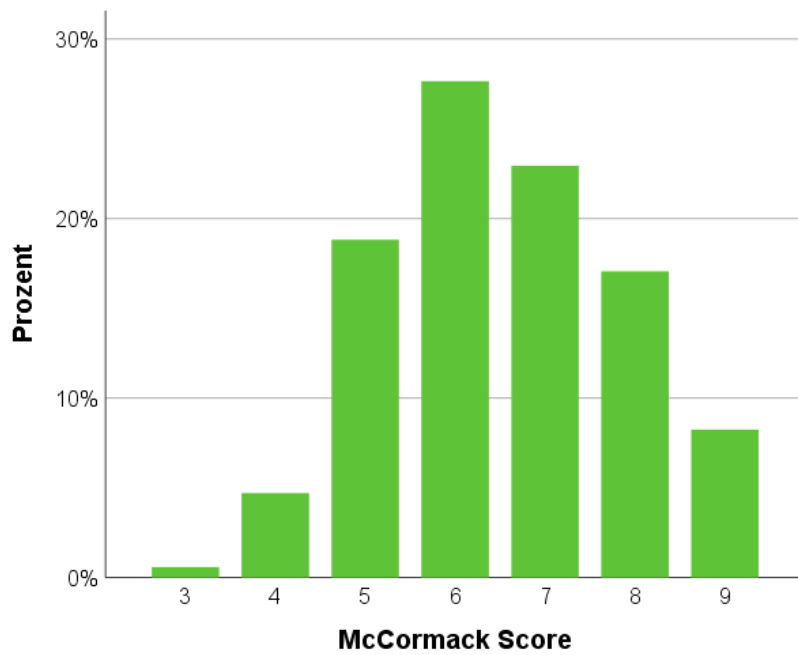


Abbildung 14: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Teilstichprobe.

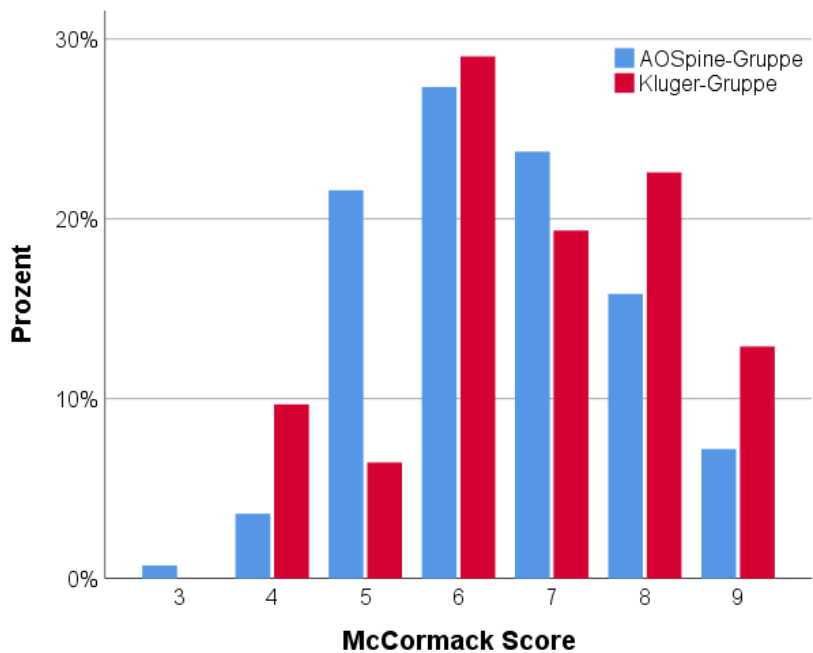


Abbildung 15: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen in der Teilstichprobe.

6.2.6 Häufigkeiten der HU-Gruppen

Gut die Hälfte aller Patienten der Teilstichprobe hatte eine verringerte Knochenqualität (44.7%, N = 76) und jeweils 27.6% (N = 47) der Patienten hatte eine gute und eine schlechte Knochenqualität. In der AOSpine-Gruppe war eine verringerte Knochenqualität am häufigsten (44.6%, N = 62), eine schlechte bzw. gute Knochenqualität kam zu 28.1% (N = 39) bzw. 27.3% (N = 27) vor. Für die Kluger-Gruppe ergab sich eine Verteilung von 45.2% (N = 14) für eine verringerte, 29% (N = 9) für eine gute und 25.8% (N = 8) für eine schlechte Knochenqualität (Tabelle 3).

Tabelle 3: Häufigkeiten der HU-Gruppen in der Teilstichprobe und in den OP-Gruppen.

	Teilstichprobe	AOSpine-Gruppe	Kluger-Gruppe
schlechte Knochenqualität (HU < 110)	27.6% (N = 47)	28.1% (N = 39)	25.8% (N = 8)
verringerte Knochenqualität (HU zwischen 110-180)	44.7% (N = 76)	44.6% (N = 62)	45.2% (N = 14)
gute Knochenqualität (HU > 180)	27.6% (N = 47)	27.3% (N = 38)	29% (N = 9)

6.3 Beantwortung der Hypothesen

6.3.1 Hypothese 1

Bei der Berechnung des t-Tests zeigte sich ein signifikanter Unterschied ($p = 0.015$) hinsichtlich des initialen Repositionsergebnisses zwischen den beiden OP-Gruppen „AOSpine“ und „Kluger“. Die OP-Gruppe „Kluger“ ($MW \pm SD = 14 \pm 9^\circ$; $N = 56$) erreichte eine größere Änderung des ${}_bGDW$ von T1 zu T2 und somit ein besseres initiales Repositionsergebnis als die OP-Gruppe „AOSpine“ ($11 \pm 7^\circ$; $N = 230$) (Abbildung 16). Die Effektstärke nach Cohen liegt bei $d = 0.4$, was einem geringen bis mittleren Effekt entspricht. Initial wurde mit dem OP-Verfahren nach Kluger eine signifikant größere Änderung des ${}_bGDW$ erreicht als mit dem OP-Verfahren nach AOSpine, die Hypothese 1 kann entsprechend angenommen werden.

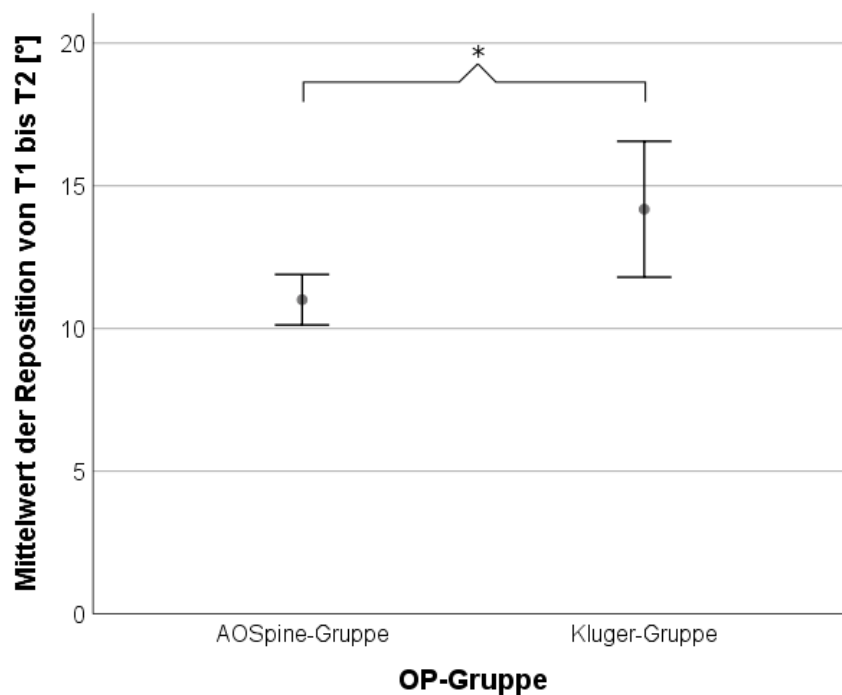


Abbildung 16: Vergleich der Mittelwerte der Reposition von T1 bis T2 [°] zwischen den OP-Gruppen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall an.

6.3.2 Hypothese 2

Bei dem Vergleich der Differenzen zwischen physiologisch angenommen ${}_b\text{GDW}$ und erreichtem ${}_b\text{GDW}$ durch die Reposition zeigte sich im t-Test, dass sich die OP-Gruppe „Kluger“ ($\text{MW} \pm \text{SD} = 0 \pm 8^\circ$; $N = 47$) signifikant zur OP-Gruppe „AOSpine“ ($\text{MW} \pm \text{SD} = -4 \pm 7^\circ$; $N = 193$) unterscheidet, $p = 0.004$ (Abbildung 17). Cohen's d beträgt $d = 0.532$ und entspricht einem mittleren Effekt. Im Gegensatz zur AOSpine-Gruppe konnte die OP-Gruppe „Kluger“ durch die Reposition im Mittel den physiologischen ${}_b\text{GDW}$ erreichen. Hypothese 2 kann ebenfalls angenommen werden.

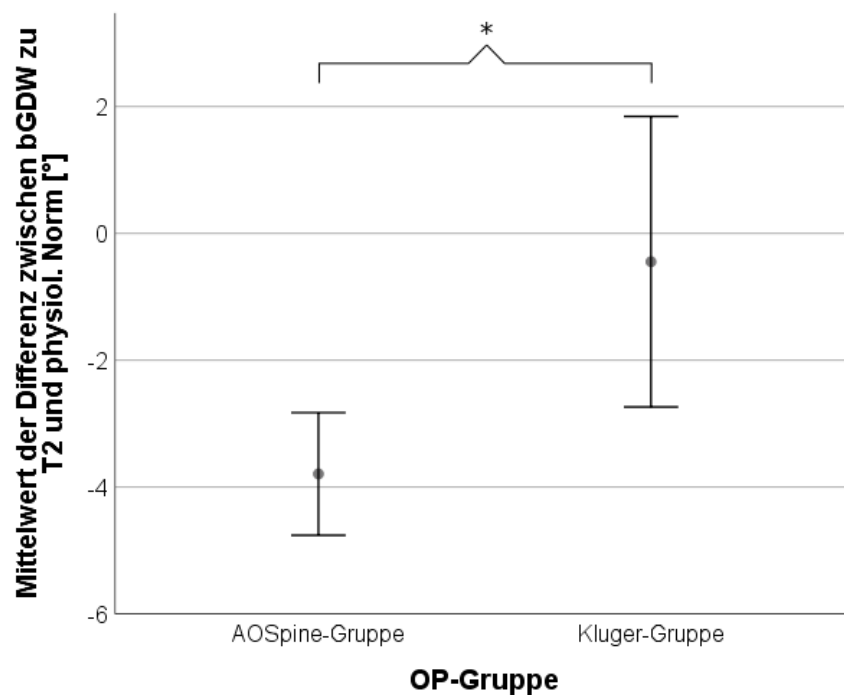


Abbildung 17: Vergleich der Mittelwerte der Differenz zwischen ${}_b\text{GDW}$ zum Zeitpunkt T2 und ${}_b\text{GDW}$ der eigens erstellten physiologischen Referenzwerte [°] zwischen den OP-Gruppen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall an.

6.3.3 Hypothese 3

Die Untersuchung des Repositionsverlusts über die Zeit (T2 bis T4) in Abhängigkeit von der OP-Gruppe mittels rmANOVA zeigte einen signifikanten Einfluss für den 1. Haupteffekt (Zeitpunkt: $F(1,168) = 149.391$, $p = 0.000$, $\eta_p^2 = 0.471$, $N = 170$). Für den 2. Haupteffekt (OP-Gruppe: $F(1,168) = 0.001$, $p = 0.982$, $\eta_p^2 = 0$, $N = 170$) lässt sich kein signifikanter Einfluss nachweisen. Grundsätzlich ist demnach ein Repositionsverlust von T2 zu T4 festzustellen – die Wahl des OP-Verfahrens hat allerdings keinen Einfluss auf diesen (Abbildung 18), Hypothese 3 muss demnach verworfen werden.

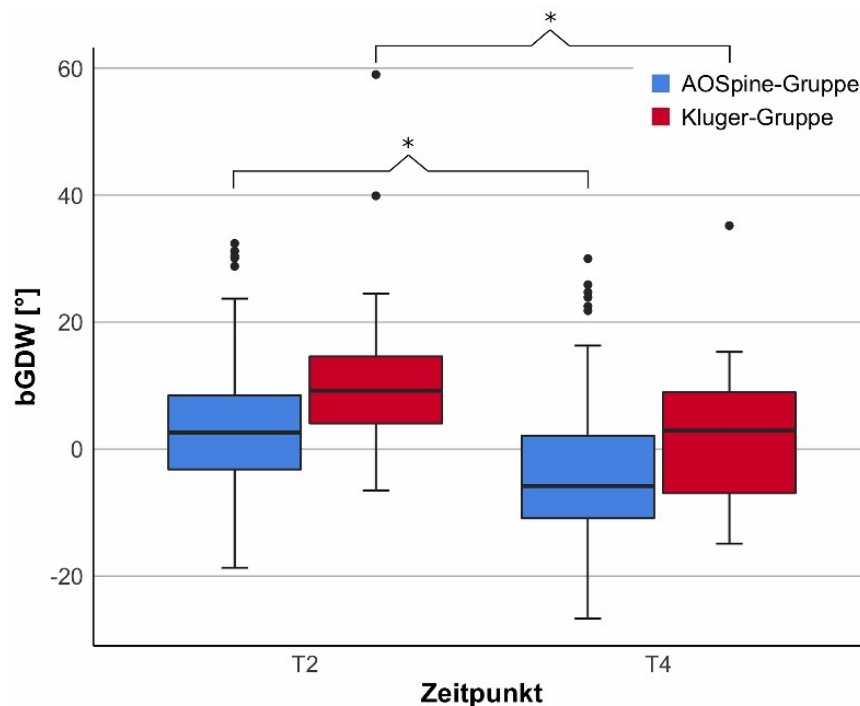


Abbildung 18: Signifikanter Repositionsverlust von T2 zu T4 sowohl in der Kluger- als auch in der AOSpine-Gruppe.

6.3.4 Hypothese 4

Eine Abhängigkeit des Repositionsverlusts über die Zeit (T2 bis T4) vom McCormack-Wert konnte mittels Spearman-Rangkorrelation nicht nachgewiesen werden ($p = 0.424$).

Die Hypothese, dass ein höherer McCormack-Wert im Vergleich zu einem niedrigeren mit einem entsprechend größeren Repositionsverlust über die Zeit einhergeht, muss abgelehnt werden.

6.3.5 Hypothese 5

Der Repositionsverlust über die Zeit (T2 bis T4) ist ebenfalls nicht vom Grad der Instabilität laut AOSpine-Klassifikation abhängig ($r_s = 0.045$, $p = 0.561$, $N = 170$). Demnach muss auch die Annahme, dass ein hoher Grad der Instabilität laut AOSpine-Klassifikation mit einem größeren Repositionsverlust über die Zeit einhergeht, verworfen werden.

6.3.6 Hypothese 6

Die Unterschiede des Repositionsverlusts über die Zeit (T3 bis T4) in Abhängigkeit der Knochenqualitäts-Gruppen wurden mittels einfaktorieller ANOVA geprüft. Diese zeigte einen signifikanten Effekt der HU-Gruppen auf den Repositionsverlust ($F(2,167) = 4.907$, $p = 0.008$, $\eta_p^2 = 0.056$, $N = 170$). Der Post-Hoc-Test nach Bonferroni zeigt für die Gruppe mit schlechter Knochenqualität einen signifikant größeren Repositionsverlust im Vergleich zu der Gruppe mit guter Knochenqualität (HU < 110 vs. HU > 180, $p = 0.007$). Allerdings zeigt sich kein signifikanter Unterschied zu dem Repositionsverlust der Gruppe mit verringerter Knochenqualität (HU < 110 vs. HU zwischen 110-180, $p = 0.128$) (Abbildung 19). Die letzte Hypothese kann insoweit angenommen werden, dass die Knochenqualität einen Einfluss auf den Repositionsverlust hat, jedoch nur bei Patienten mit schlechter Knochenqualität, hier definiert als ein HU-Wert < 110.

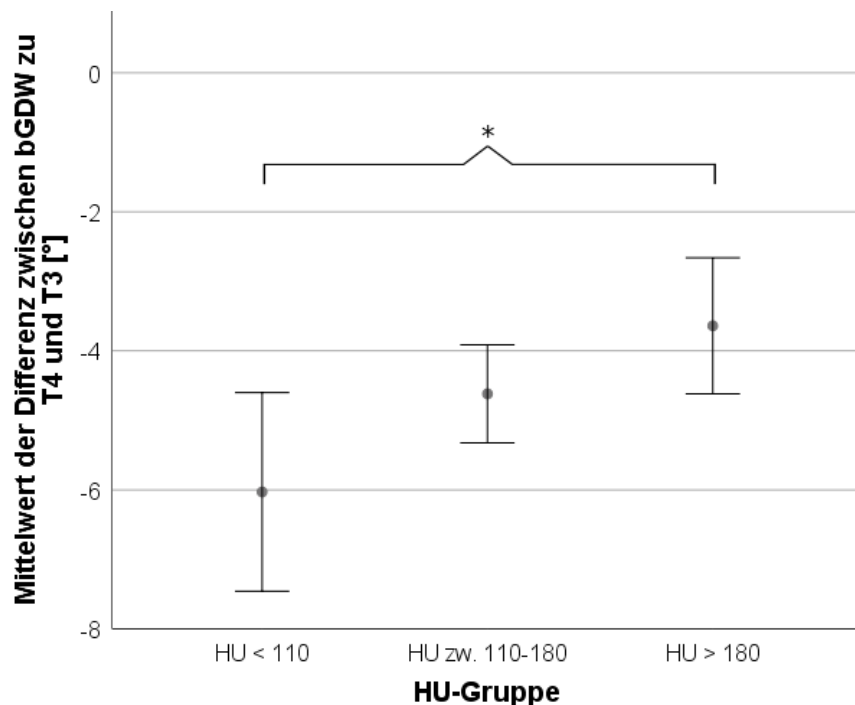


Abbildung 19: Vergleich der Mittelwerte der Differenz zwischen $bGDW$ zum Zeitpunkt T4 und T3 [°] zwischen den HU-Gruppen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall an.

7 Diskussion

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, zwei verschiedene OP-Methoden für thorakolumbale Wirbelsäulenverletzungen hinsichtlich des initialen und langfristigen Repositionsergebnisses zu vergleichen. Die OP-Methode nach der AOSpine beinhaltet eine Lordosierung unter Distraction, wohingegen das Operationsvorgehen nach Kluger eine Lordosierung mit Verkürzung der dorsalen Strukturen unter Kompression vorsieht. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die OP-Methode „Kluger“ im Vergleich zur Methode „AOSpine“ bessere Ergebnisse hinsichtlich des Repositionsergebnisses liefere. Außerdem wurde untersucht, inwiefern die Knochendichte und die Schweregrad-Klassifikation nach McCormack und der AOSpine eine Aussagekraft hinsichtlich des Repositionsergebnisses haben. Es wurden 1538 Fälle mit entsprechender Fixateur interne-OP aus einem Zeitraum von ca. 15 Jahren retrospektiv ausgewertet, wovon 620 Patienten in die Studie eingeschlossen werden konnten. Die Ergebnisse zeigen, dass die OP-Gruppe „Kluger“ ein initial besseres Repositionsergebnis, also eine größere Änderung des vor der OP bestehenden bGDW des betroffenen Wirbels, erreichen konnte. Die Repositionsergebnisse der OP-Gruppe „Kluger“ erreichten initial eher die eigens erstellten hypothetischen physiologischen bGDW als die Gruppe „AOSpine“. Bei 170 Fällen mit vergleichbaren Follow-Up-Abständen konnte in dem betrachteten Follow-Up-Zeitraum von sechs Monaten kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Methoden hinsichtlich des Repositionsergebnisses nachgewiesen werden. Allerdings kam es bei beiden Gruppen über die Zeit zu einem signifikanten Repositionsverlust. Es ergab sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Klassifikation nach McCormack und nach AOSpine und dem Repositionsverlust nach einem halben Jahr. Die Knochendichte, erfasst als Hounsfield Units, hatte einen signifikanten Einfluss auf den Repositionsverlust. Patienten mit besonders niedrigen HU-Werten hatten einen signifikant stärkeren Repositionsverlust innerhalb von sechs Monaten als Patienten, die besonders hohe HU-Werte aufwiesen.

7.1 Diskussion der Methoden

In dieser retrospektiven Arbeit wurde die Wirbelsäulenverletzung nach AOSpine und McCormack klassifiziert, die Knochendichte als Mittelwert aus sechs verschiedenen Messungen als HU-Wert erfasst und der bGDW des verletzten Wirbels bei allen vorhandenen Röntgen- und CT-Bildern eines Patienten ausgemessen. All diese Messungen wurden von der Verfasserin selbst durchgeführt, sodass kein Interrater-Bias

entstehen konnte. Zu Beginn der Messungen hatte die Verfasserin zusammen mit einem erfahrenen Kliniker die Technik der Messungen an entsprechenden Übungsfällen geübt. Trotz dieser Übungen und die durch die im Verlauf der Messungen gestiegene Erfahrung ist nicht auszuschließen, dass manche Fälle hinsichtlich der AOSpine-Klassifikation und des McCormack-Wertes falsch klassifiziert wurden. Gerade bei der Klassifizierung von B-Frakturen nach AOSpine ist es denkbar, dass der Verfasserin eventuell vorhandene ligamentäre Verletzungen entgangen sind und diese somit dann als A-Fraktur klassifiziert wurden. Bereits Vaccaro und Kollegen (Vaccaro et al. 2013) hatten angemerkt, dass vor allem Patienten mit B- oder C-Frakturen im Vergleich zu Patienten mit A-Frakturen fehldiagnostiziert werden könnten, da die ligamentären Verletzungen in manchen Fällen schwer zu diagnostizieren sind.

Diverse Reliabilitäts-Studien der noch recht jungen AOSpine-Klassifikation haben gezeigt, dass die Intrarater-Reliabilität stets besser ist als die Interrater-Reliabilität (Sadiqi et al. 2015, Kepler et al. 2016, Kaul et al. 2017, Schnake et al. 2017b, Yacoub et al. 2017). Zwei Studien (Sadiqi et al. 2015, Rajasekaran et al. 2017b) konnten außerdem nachweisen, dass die Erfahrung der Chirurgen keinen maßgeblichen Einfluss auf die Fraktur-Klassifikation hatte (Gruppeneinteilung in „< als 10 Jahre Erfahrung“ und „> als 10 Jahre Erfahrung“ in der ersten Studie und „< als 10 Jahre Erfahrung“, „zwischen 11 und 20 Jahre Erfahrung“ und „> als 20 Jahre Erfahrung“ in der zweiten Studie). Dennoch zeigte sich bei Rajasekaran und Kollegen, dass die weniger erfahrenen Chirurgen bei der Klassifizierung von A3-, A4- und B1-Frakturen besser abschnitten. Sadiqi und Kollegen konnten zeigen, dass die meisten Fehlklassifikationen durch die am meisten erfahrenen Chirurgen erfolgten. Als mögliche Erklärung diskutieren die Autoren, dass die älteren Chirurgen möglicherweise mehr Schwierigkeiten haben, sich an ein neues Klassifikationssystem zu gewöhnen, nachdem sie zuvor jahrelang andere Klassifikationssysteme verwendet hatten. Der „Erfahrungsfaktor“ scheint zumindest nach ungefähr einer Dekade an klinischer und chirurgischer Erfahrung keinen Einfluss mehr auf die Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen nach der AOSpine-Klassifikation zu haben.

Bei der McCormack-Klassifikation können in der vorliegenden Studie mögliche Fehlmessungen vor allem in der Beurteilung des Ausmaßes der Zerstörung des Wirbelkörpers und der Beurteilung der Verlagerung der Frakturteile stattgefunden haben, da die Wirbelkörper in der Realität selten eine so geordnete Frakturmorphologie wie auf den

Schemazeichnungen der McCormack-Klassifikation aufweisen und somit die Klassifizierung hinsichtlich des Ausmaßes immer nur eine ungefähre Schätzung sind. Hinsichtlich der Intrarater-Reliabilität des McCormack-Wertes berichten zwei Studien von Kappa-Werten, entsprechend der Kriterien von Landis und Koch (Landis und Koch 1977), die zwischen „leichter Übereinstimmung“ (κ zwischen 0 und 0.20) bis „vollkommener Übereinstimmung“ (κ zwischen 0.81 und 1) liegen. Dai und Kollegen (Dai und Jin 2005) errechneten bei einer Stichprobengröße von 45 Patienten mit einem thorakolumbalen Berstungsbruch, fünf Bewertern und einem Zeitabstand von drei Monaten Kappa-Werte zwischen 0.73 und 0.87 für den McCormack-Wert. Elzinga und Kollegen (Elzinga et al. 2012) fanden Kappa-Werte zwischen 0.03 und 0.43 bei einer Stichprobe von 40 thorakolumbalen Frakturen, drei Bewertern und einem Zeitabstand von ungefähr sechs Monaten. Die in der Literatur gezeigte große Variabilität in den Kappa-Werten führt zu der Einschätzung, dass die Verlässlichkeit der McCormack-Werte kritisch zu beurteilen ist.

Bezüglich der in dieser Studie verwendeten Röntgen- und CT-Bilder und der Winkelmessung gibt es verschiedene Punkte die kritisch zu betrachten sind. Zum einen hat der lange retrospektive Untersuchungszeitraum die Konsequenz, dass sich die Qualität der radiologischen Bilder der Patienten aus dem Jahr 2001 deutlich von den Bildern der Patienten aus dem Jahr 2016 unterscheidet, was in der technologischen Entwicklung innerhalb dieses Zeitraums begründet liegt. Bereits 1990 hatten Shaffer und Kollegen (Shaffer et al. 1990) nachweisen können, dass die Qualität von Röntgen-Bildern einen maßgeblichen Einfluss auf die Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen hat. Zum anderen ist keine Objektivität und Standardisierung in dem Sinne gewährleistet gewesen, dass bei jedem Patienten das gleiche Röntgen- oder CT-Gerät verwendet und vom gleichen Medizinisch-technischen Radiologieassistenten bedient wurde. Ein Teil der Follow-Up-Aufnahmen wurde zudem in ambulanten Radiologie-Praxen aufgenommen und dann zur Besprechung in der Ambulanz des Bergmannstrossts mitgebracht.

Die Winkelmessung nach Cobb hat eine ausgezeichnete Intrarater-Reliabilität und ist somit ein guter, reproduzierbarer und reliabler Parameter für die Erfassung einer traumatischen Kyphose als auch einer normalen lumbalen Lordose (Keynan et al. 2006, Street et al. 2009, Jiang et al. 2012). Weltweit ist es einer der am häufigsten angewandten Parameter zur Messung der Kyphose bei traumatischen

Wirbelsäulenverletzungen (Sadiqi et al. 2017). Allerdings besteht Unklarheit bezüglich des Vorgehens bei der Messung, da die Endplatte des oberen Wirbelkörpers im dorsalen Bereich häufig eine schmale Erhöhung aufweist und nicht klar definiert ist, ob diese bei der Messung einbezogen oder ob die Gerade lediglich entlang der Fläche der oberen Endplatte ohne Berücksichtigung der Erhöhung gezogen werden soll. Keynan und Kollegen (Keynan et al. 2006) empfehlen, diese Erhöhung auf der Endplatte des oberen Wirbelkörpers bei der Messung des Cobb Winkels zu ignorieren, was bei den Messungen in dieser Arbeit befolgt wurde.

Ein weiterer kritisch zu bewertender Aspekt ist die gleichzeitige Verwendung von Röntgen- und CT-Bildern innerhalb eines Patientenfalls und daraus folgend die Frage der Vergleichbarkeit der Winkelmessungen. Street und Kollegen (Street et al. 2009) fanden zum einen heraus, dass die Messung der Kyphose bei thorakolumbalen Frakturen in Röntgenbildern eine bessere Inter- und Intrarater-Reliabilität im Vergleich zum CT und MRT aufwies und zum anderen, dass zwischen den nativen Röntgen- und CT-Bildern eine sehr hohe intermodale Übereinstimmung bestand. Dem gegenüber stehen die Ergebnisse von Jiang und Kollegen (Jiang et al. 2012), die einen Vorteil für sagittale CT-Bilder hinsichtlich der Inter- und Intra-Reliabilität im Vergleich zu Röntgen-Bildern nachweisen konnten. Für die Übereinstimmung von Röntgen- und CT-Bildern bei der Klassifizierung von A-Frakturen fanden Rajasekaran und Kollegen (Rajasekaran et al. 2017c) ein Kappa von 0.31 und bei B-Frakturen ein Kappa von 0.19. Beim Vergleich dieser beiden Methoden muss bedacht werden, dass Patienten bei CT-Aufnahmen liegen und bei Röntgen-Aufnahmen häufig stehen. Allerdings ist bei den in dieser Arbeit verwendeten Fällen davon auszugehen, dass sowohl die CT- als auch die Röntgen-Bilder im Rahmen der Akutversorgung im Liegen aufgenommen wurden. Angesichts der Datenlage in der Literatur und aus der eigenen Erfahrung heraus ist davon auszugehen, dass CT-Bilder bessere Bedingungen für die Klassifizierung und Winkelmessung bei thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen bieten als Röntgen-Bilder. Aufgrund des retrospektiven Charakters dieser Studie musste auf beide Arten von Bildern zurückgegriffen werden um genügend Daten für die Beantwortung der Hypothesen sammeln zu können.

Um den Einfluss der Knochendichte auf das langfristige Repositionsergebnis zu untersuchen wurde bei jedem Patienten ein durchschnittlicher Hounsfield Unit Wert der Wirbelsäule erfasst, da die HU-Werte nachweislich mit den Werten der

Doppelröntgenenergieabsorptiometrie (DXA) und der Druckfestigkeit korrelieren und die Messung dieser eine ausgezeichnete Intrarater-Reliabilität aufweisen (Schreiber et al. 2011). Zudem gibt es in der Literatur Hinweise darauf, dass die Identifizierung von Patienten mit unerwarteten osteoporotischen Kompressionsfrakturen mittels CT besser gelingt als mit der DXA, welche bei degenerativen Veränderungen zu einer Überschätzung der Knochenmineraldichte zu neigen scheint (Pickhardt et al. 2013). Somit kann die mittels CT durchgeführte HU-Wert-Messung als eine für die Bewertung der Knochenqualität angemessene Methode betrachtet werden. Dass die HU-Werte in dieser Studie nicht einheitlich über alle Patienten hinweg in jeweils den gleichen Wirbelkörpern erfasst wurden kann als unproblematisch angesehen werden, da es keine signifikanten Unterschiede bezüglich der HU-Wert-Messungen zumindest zwischen LWK 1 bis LWK 4 innerhalb eines Individuums zu geben scheint (Schreiber et al. 2011).

Ein weiterer diskutabler Punkt der methodischen Vorgehensweise ist die Verwendung der eigens erstellten hypothetischen physiologischen bGDW -Referenzwerte. Es ist eindeutig, dass es keine definitiven und einheitlichen Normwerte geben kann, da es bei gesunden Personen eine große Variabilität hinsichtlich des sagittalen Profils gibt (Stagnara et al. 1982, Roussouly et al. 2005, Barrey et al. 2007) und dieses für jedes Individuum charakteristisch zu sein scheint (Berthonnaud et al. 2005, Meakin et al. 2009). Zudem wird die lumbale Lordose mit dem Alter geringer, wobei es hierbei zusätzlich noch einen Geschlechterunterschied zu geben scheint (Dreischarf et al. 2014, Iyer et al. 2016, Asai et al. 2017). Abgesehen von der generellen Variabilität des sagittalen Wirbelsäulenprofils wurde die Variabilität, hervorgerufen durch die Faktoren Alter und Geschlecht, bei den hier erstellten Normwerten nicht berücksichtigt.

Weitere potentielle Einschränkungen bezüglich der Methoden sind die Nicht-Erfassung von zementaugmentierten Schrauben und vor, während oder nach der Fixateur-OP durchgeführte Kypho- oder Vertebroplastien. Es ist anzunehmen, dass durch beide Verfahren eine verbesserte Stabilität des Implantats bzw. der Wirbelsäule an sich und damit einhergehend ein besseres Repositionsergebnis erreicht werden kann (Liao und Fan 2017, Zhang et al. 2017). Patienten mit einer zweiten (behandelten) Wirbelsäulenverletzung an einer anderen Stelle und Patienten, bei denen eine Indexschraube in den frakturierten Wirbelkörper eingebracht wurde, wurden ebenfalls nicht separat dokumentiert bzw. ausgeschlossen. Allerdings scheint eine Indexschraube keinen Unterschied bezüglich des Repositionsverlustes zu machen (Spiegel et al. 2016). Somit sind

diese Fälle hinsichtlich des Repositionsergebnisses streng genommen nicht mehr vergleichbar mit den Fällen, die nur den einen Fixateur interne ohne zusätzliche Verfahren implantiert bekommen haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Arbeit bezüglich der Methodik einige Schwachstellen aufweist, die zum großen Teil durch den retrospektiven Charakter bedingt sind und bei der Interpretation der Ergebnisse bedacht werden müssen.

7.2 Diskussion der Ergebnisse

Von 1538 untersuchten Fallnummern konnten letztlich 620 Fälle in die Studie eingeschlossen werden. Gründe für den Ausschluss waren u.a. mehrere Fallnummern pro Patient durch Wiederaufnahme zu einem späteren Zeitpunkt, Frakturlokalisierung außerhalb des thorakolumbalen Übergangs, Implantation eines monosegmentalen oder mehrsegmentalen Fixateurs, kein oder kein qualitativ gutes prä-OP-CT-Bild, weniger als zwei qualitativ gute post-OP-Bilder und Operation erst nach sieben Tagen. Eine weitere Einschränkung der Studie ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass sich die Fallzahlen in beiden Gruppen nicht gleichen und die OP-Gruppe „Kluger“ insgesamt eine sehr niedrige Fallzahl aufweist.

Die beiden Hypothesen, dass die OP-Gruppe „Kluger“ bessere initiale Repositionsergebnisse und eher die als physiologisch angenommenen bGDW erreichen würde als die OP-Gruppe „AOSpine“ konnten bestätigt werden. Ähnliche Vergleichsstudien dieser beiden OP-Techniken scheint es aktuell nicht zu geben, genauso wie Studien, die versuchen das Repositionsergebnis anhand von Normwerten zu evaluieren. Der Sinn bzw. der Nutzen des letzteren Vergleichs bleibt aufgrund der hohen Variabilität des sagittalen Wirbelsäulenprofils, wie bereits oben diskutiert, fraglich. Interessant wäre es, wenn es eine Methode gäbe, mit der sich das individuelle Profil und somit das Repositionsziel definieren ließe. Die OP-Gruppen Verteilung zeigt, dass das OP-Verfahren „AOSpine“ in der vorliegenden Stichprobe weitaus häufiger angewendet wurde. Gründe dafür könnten sein, dass die Empfehlungen der AO national und international von großer Bedeutung sind und somit auch einen besonderen Schwerpunkt in der Ausbildung der Fachärzte bilden, sodass sie von diesen gegenüber alternativen Vorgehensweisen favorisiert werden. Trotz allem muss bedacht werden, dass die Frakturmorphologie eine entscheidende Rolle spielt und hinsichtlich des Operationsverfahrens somit immer situativ entschieden wird, welches Verfahren das am besten geeignetste ist.

Bei der Betrachtung des langfristigen Repositionsergebnisses konnte kein Vorteil für die OP-Methode „Kluger“ nachgewiesen werden. Bei beiden OP-Verfahren kam es in der zur Beantwortung der Repositionsverlust-Hypothesen verwendeten Stichprobe innerhalb eines halben Jahres zu einem signifikanten Repositionsverlust. Bei Wirbelsäulenverletzungen ist das Ziel der OP, dass das Implantat die verletzte Wirbelsäule so lange vor den tagtäglich auf sie einwirkenden Einflüssen schützt, bis diese wieder verheilt ist und ihre vormalige Stabilität wiedererlangt hat. Somit ist neben dem initialen vor allem das langfristige Repositionsergebnis für die Beurteilung der Effektivität eines OP-Verfahrens von Bedeutung. Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist es allgemein bekannt, dass es nach der Operation von Wirbelsäulenverletzungen bei den verschiedensten Verfahren zu einem Repositionsverlust kommt. Bei der OP-Gruppe „Kluger“ kam es vom Zeitpunkt der OP bis zum ersten Follow-Up zu einem mittleren Repositionsverlust von -2.96 (SD = 4.23) bzw. bis zum zweiten Follow-Up zu einem mittleren Repositionsverlust von -7.51 (SD = 6.13). Die Werte der OP-Gruppe „AOSpine“ verhalten sich ähnlich mit -2.84 (SD = 3.49) für den erstgenannten Zeitraum und -7.63 (SD = 4.65) für den zweiten. Verschiedenste Studien fanden bei instabilen Wirbelkörperfrakturen ebenfalls einen signifikanten Repositionsverlust bei isolierter dorsaler Stabilisierung (ohne Angabe des genauen chirurgischen Vorgehens) mit Werten zwischen -5.1 und -9.4 für Follow-Up Zeiträume zwischen 2 und 25.5 Monaten (Lakshmanan et al. 2009, Reinhold et al. 2009b, Spiegl et al. 2016). Lakshmanan und Kollegen (Lakshmanan et al. 2009) fanden heraus, dass der Repositionsverlust hauptsächlich durch die Nachsinterung des frakturierten Wirbelkörpers im anterioren Wirbelkantenbereich bedingt war. Andere Autoren führen den Repositionsverlust auf die zerstörten Bandscheiben in dem Segment und die daraus folgende Nachsinterung dieser zurück (Liljenqvist und Mommsen 1995, Knop et al. 1997, Wälchli et al. 2001, Katscher et al. 2003, Wang et al. 2008). Offensichtlich ist bei instabilen Wirbelkörperfrakturen eine alleinige dorsale Stabilisierung oftmals nicht ausreichend um die physiologische Wirbelsäulenform langfristig wieder herzustellen und eine zusätzliche ventrale Versorgung in Betracht zu ziehen (Gonschorek et al. 2015). Damit übereinstimmende Ergebnisse konnten Reinhold und Kollegen vorlegen, in ihrer Studie war der Repositionsverlust bei einer kombinierten dorsoventralen Behandlung signifikant geringer als bei einer isolierten dorsalen Behandlung (-3.8° vs. -6.1° , $p = 0.005$) (Reinhold et al. 2009b). Möglicherweise war die alleinige dorsale Stabilisierung oder aber die mechanische Stabilität des Fixateur interne an sich in der hier untersuchten Stichprobe nicht

ausreichend, um das initiale Repositionsergebnis über einen Zeitraum von einem halben Jahr in zufriedenstellender Weise aufrecht zu erhalten. Das intra-operative Vorgehen an sich, ob zuerst unter dorsaler Verkürzung distrahiert und anschließend lordosiert („Kluger-Methode“) oder zuerst unter dorsalem Längenerhalt lordosiert und dann mithilfe der fixierten Schanz-Schrauben distrahiert wird („AOSpine-Methode“), scheint hier keinen Einfluss auf den langfristigen Repositionsverlust zu haben.

Es bleibt allerdings die Frage zu klären, wie viel Variation in der Winkelmessung akzeptiert wird und ab wann von einer wahren Änderung der Winkel und somit von einem Repositionsverlust ausgegangen werden kann. Polly und Kollegen (Polly et al. 1996) schlagen eine akzeptable Variabilität von 10° vor, da in ihrer Studie 92% der wiederholten Cobb-Winkel Messungen von drei Bewertern weniger als 10° Unterschied zu den vorherigen Messungen aufwiesen. Eine Differenz von 11° zeigte sich beim 95%-Konfidenzintervall von Carman und Kollegen (Carman et al. 1990). Andere Autoren setzen die Grenze für eine wahre Änderung des Cobb Winkels (bei Verwendung in der frontalen Ebene) bei 5° (Vrtovec et al. 2009). Spiegl und Kollegen (Spiegl et al. 2016) setzen die Grenze für einen relevanten Repositionsverlust bei 5° . Angesichts dessen sprechen die in dieser Studie gefundenen Repositionsverluste möglicherweise weniger für wahre Verluste, sondern eher für Methoden-bedingte Messfehler. Falls dem so ist kann allerdings davon ausgegangen werden, dass diese Messfehler über beide OP-Gruppen gleichmäßig verteilt sind, sodass daran festgehalten werden kann, dass keines der beiden OP-Verfahren in der hier untersuchten Stichprobe einen signifikanten Vorteil hinsichtlich des Repositionsergebnisses nach einem halben Jahr mit sich bringt.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Klassifikationen nach McCormack und AOSpine keinen signifikanten Zusammenhang mit dem langfristigen Repositionsverlust aufweisen. Ähnliche Ergebnisse fanden Spiegl und Kollegen, in ihrer Studie fand sich keine signifikante Korrelation zwischen dem Repositionsverlust und der Frakturmorphologie nach der AOSpine- und der McCormack-Klassifikation (Spiegl et al. 2016). Mittels der McCormack-Klassifikation sollen Frakturen, die ein zusätzliches ventrales Vorgehen benötigen würden, identifiziert werden können, was nach McCormacks Untersuchungen ab einem Wert \geq sieben Punkten der Fall sei (McCormack et al. 1994). Gerade in der hier untersuchten Stichprobe mit alleinigem dorsalen Vorgehen und einem radiologisch messbaren und statistisch signifikanten Repositionsverlust wäre zu erwarten gewesen, dass es eine signifikante Korrelation mit dem

McCormack-Wert geben würde. Möglicherweise konnte dieser Zusammenhang aufgrund von Messfehlern und Fehl-Klassifikationen nicht gezeigt werden. Eine andere Begründung könnte jedoch sein, dass die McCormack-Klassifikation keine inhaltssvalide Aussage über das Implantatversagen bei nicht rekonstruierter vorderer Säule macht, diesen Aspekt also nicht verlässlich abbildet. In der Literatur lassen sich Studien finden, die diesen Zusammenhang bei Verwendung eines bisegmentalen bzw. langstreckigen Fixateur interne ebenfalls nicht nachweisen konnten (Avanzi et al. 2010, Gelb et al. 2010).

Demgegenüber soll mit der AOSpine-Klassifikation unter Berücksichtigung der morphologischen und neurologischen Charakteristiken und weiteren klinischen Parametern der Instabilitätsgrad der thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzung abgebildet werden, um anschließend die optimale Therapie auswählen zu können (Vaccaro et al. 2013, Vaccaro et al. 2016). Somit ist die AOSpine-Klassifikation allein schon von ihrer Entwicklung her nicht als ein Instrument zur Einschätzung des potentiellen Repositionsverlustes anzusehen. Es ist anzunehmen, dass eine Stabilisierung der Wirbelsäulenverletzung nach wie vor klinisch suffizient sein kann, auch wenn es zu einem (geringgradigen) Repositionsverlust gekommen ist. Neben den klinischen und neurologischen spielen v.a. die funktionalen Parameter dabei eine maßgebliche Rolle. Verschiedenste Studien konnten zeigen, dass Patienten selbst bei Repositionsverlusten hinsichtlich der o.g. Parameter nicht maßgeblich beeinträchtigt waren bzw. es zu funktionalen Verschlechterungen kam (Wälchli et al. 2001, Katscher et al. 2003, Wang et al. 2008).

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Repositionsverlust und HU-Wert konnte nachgewiesen werden, dass die Patienten mit einem HU-Wert < 110 einen signifikant stärkeren Repositionsverlust aufwiesen als Patienten einem HU-Wert > 180 . In der Literatur lassen sich ähnliche Zusammenhänge zwischen HU-Wert und Fusion nach Lumbar Interbody Fusion, Frakturen der angrenzenden Segmente und symptomatischer Pseudarthrose nach Posterolateraler lumbaler Fusion finden (Meredith et al. 2013, Schreiber et al. 2014, Nguyen et al. 2015). Wäre die Einteilung der Patienten in die HU-Gruppen bereits bei der Beantwortung der vorhergehenden Hypothesen berücksichtigt worden, wären die jeweiligen Ergebnisse noch aufschlussreicher, da somit keine Verzerrung des Gesamtergebnisses durch z.B. eine niedrige Knochendichte aufgetreten wäre.

8 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Lordosierung unter Verkürzung der dorsalen Strukturen bei der OP-Methode „Kluger“ einen Vorteil hinsichtlich des initialen Repositionsergebnisses im Vergleich zur AOSpine-Methode bietet, welche unter Distraction lordosiert. Die Überlegenheit der Kluger-Methode spiegelt sich ebenfalls in den erreichten bGDW wieder, die eher die hypothetischen physiologischen bGDW erreichen als die der AOSpine-Methode. Langfristig kommt es allerdings bei beiden Methoden zu einem Repositionsverlust, hier ist die Überlegenheit der Kluger-Methode nicht mehr nachweisbar. Das intraoperative Vorgehen scheint offenbar keinen Einfluss auf das langfristige Ergebnis zu haben.

Die McCormack- und die AOSpine-Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen zeigen keinen Zusammenhang mit dem langfristigen Repositionsverlust nach Reposition und Stabilisierung von Frakturen des TLÜ mittels Fixateur interne, was insbesondere bei der McCormack-Klassifikation überrascht, da diese mit zunehmendem Wert eine höhere Wahrscheinlichkeit für ein Implantatversagen bei alleiniger dorsaler Versorgung vorhersagen soll. Der Nutzen dieser Klassifikation ist somit fraglich. Die AOSpine-Klassifikation dient der genauen Einteilung der Verletzung anhand der Frakturmorphologie und weiterer relevanter Modifikatoren, sodass daraus entsprechende therapeutische Konsequenzen abgeleitet werden können. Sie bietet die Möglichkeit für eine weltweit einheitlichere Diagnostik und Therapie bei thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen und verbessert damit den wissenschaftlichen Austausch – für eine Aussage hinsichtlich des langfristigen Repositionsergebnisses scheint sie keinen Nutzen zu bringen. Einhergehend mit Ergebnissen der Literatur konnten wir zeigen, dass eine hohe Knochendichte im Sinne von hohen HU-Werten zu einem geringeren Repositionsverlust innerhalb eines halben Jahres führt als niedrige HU-Werte. Demnach ist es empfehlenswert, präoperativ die Knochendichte zu bestimmen um anschließend die individuelle Behandlung der Wirbelsäulenverletzung optimieren zu können. Die oben diskutierten Defizite der vorliegenden Arbeit sind zum Teil charakteristisch für retrospektive Arbeiten. Eine zukünftige Studie sollte prospektiv ausgelegt sein, wodurch auch eine bessere Standardisierung der Methoden sowie vergleichbare Fallzahlen in beiden Gruppen erreicht werden könnten.

9 Literaturverzeichnis

- Asai Y, Tsutsui S, Oka H, Yoshimura N, Hashizume H, Yamada H, Akune T, Muraki S, Matsudaira K, Kawaguchi H, Nakamura K, Tanaka S, Yoshida M. 2017. Sagittal spino-pelvic alignment in adults: The Wakayama Spine Study. *PloS one* 12:e0178697.
- Avanzi O, Landim E, Meves R, Caffaro MF, Albuquerque Araujo Luyten F de, Faria AA. 2010. Thoracolumbar Burst Fracture: Load Sharing Classification and Posterior Instrumentation Failure. *Revista Brasileira de Ortopedia (English Edition)* 45:236–240.
- Barrey C, Jund J, Nosedá O, Roussouly P. 2007. Sagittal balance of the pelvis-spine complex and lumbar degenerative diseases. A comparative study about 85 cases. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 16:1459–1467.
- Barrey C, Roussouly P, Le Huec J-C, D'Acunzi G, Perrin G. 2013. Compensatory mechanisms contributing to keep the sagittal balance of the spine. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 22 Suppl 6:834-41.
- Berthonnaud E, Dimnet J, Roussouly P, Labelle H. 2005. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *Journal of spinal disorders & techniques* 18:40–47.
- Breasted JH. 1930. Edwin Smith Surgical Papyrus, in Facsimile and Hieroglyphic Transliteration with Translation and Commentary, 2 vols. Chicago: University of Chicago Oriental Institute Publications.
- Bühren V, Josten C. 2013. Chirurgie der verletzten Wirbelsäule. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Carman DL, Browne RH, Birch JG. 1990. Measurement of scoliosis and kyphosis radiographs. Intraobserver and interobserver variation. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 72:328–333.
- Cohen J. 2013. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Hoboken: Taylor and Francis.
- Dai L-Y, Jin W-J. 2005. Interobserver and intraobserver reliability in the load sharing classification of the assessment of thoracolumbar burst fractures. *Spine* 30:354–358.
- Davis AG. 1929. Fractures of the spine. *J Bone Joint Surg Am* 11:133–156.
- Denis F. 1983. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 8:817–831.
- Dick W. 1984. Innere Fixation von Brust- und Lendenwirbelfrakturen. Bern: Huber.

- Dick W, Kluger P, Magerl F, Woersdorfer O, Zach G. 1985. A new device for internal fixation of thoracolumbar and lumbar spine fractures: the 'fixateur interne'. *Paraplegia* 23:225–232.
- Diller H. 1962. Hippokrates: Schriften. Die Anfänge der abendländischen Medizin. Reinbek b. Hamburg: Rowohlt.
- Dreischarf M, Albiol L, Rohlmann A, Pries E, Bashkuev M, Zander T, Duda G, Druschel C, Strube P, Putzier M, Schmidt H. 2014. Age-related loss of lumbar spinal lordosis and mobility--a study of 323 asymptomatic volunteers. *PloS one* 9:e116186.
- Elzinga M, Segers M, Siebenga J, Heilbron E, Lange-de Klerk ESM de, Bakker F. 2012. Inter- and intraobserver agreement on the Load Sharing Classification of thoracolumbar spine fractures. *Injury* 43:416–422.
- Eysel P, Meinig G. 1991. Comparative study of different dorsal stabilization techniques in recent thoraco-lumbar spine fractures. *Acta neurochirurgica* 109:12–19.
- Gelb D, Ludwig S, Karp JE, Chung EH, Werner C, Kim T, Poelstra K. 2010. Successful treatment of thoracolumbar fractures with short-segment pedicle instrumentation. *Journal of spinal disorders & techniques* 23:293–301.
- Gonschorek O, Hauck S, Weiß T, Bühren V. 2015. Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule. *Der Chirurg* 86:901-914; quiz 915-916.
- Hadra BE. 1975. The classic: Wiring of the vertebrae as a means of immobilization in fracture and Potts' disease. Berthold E. Hadra. *Med Times and Register*, Vol22, May 23, 1891. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 112:4–8.
- Harrington PR. 1962. Treatment of scoliosis. Correction and internal fixation by spine instrumentation. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 44-A:591–610.
- Harrington PR. 1988. The history and development of Harrington instrumentation. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 227:3–5.
- Holdsworth FW. 1963. Fractures, dislocations, and fracture-dislocations of the spine. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 45:6–20.
- Holdsworth FW, Hardy A. 1953. Early treatment of paraplegia from fractures of the thoraco-lumbar spine. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 35-B:540–550.
- Iyer S, Lenke LG, Nemani VM, Albert TJ, Sides BA, Metz LN, Cunningham ME, Kim HJ. 2016. Variations in Sagittal Alignment Parameters Based on Age: A Prospective Study of Asymptomatic Volunteers Using Full-Body Radiographs. *Spine* 41:1826–1836.
- Jiang S-D, Wu Q-Z, Lan S-H, Dai L-Y. 2012. Reliability of the measurement of thoracolumbar burst fracture kyphosis with Cobb angle, Gardner angle, and sagittal index. *Archives of orthopaedic and trauma surgery* 132:221–225.

- Josten C, Schmidt C, Spiegl U. 2012. Osteoporotische Wirbelkörperfrakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule. Diagnostik und Behandlungsstrategien. Der Chirurg; Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin 83:866–874.
- Katscher S, Verheyden P, Gonschorek O, Glasmacher S, Josten C. 2003. Thorakolumbale Wirbelfrakturen nach konservativer und operativer Behandlung. Abhängigkeit des Korrekturverlustes von der Hohenlokalisation. Der Unfallchirurg 106:20–27.
- Kaul R, Chhabra HS, Vaccaro AR, Abel R, Tuli S, Shetty AP, Das KD, Mohapatra B, Nanda A, Sangondimath GM, Bansal ML, Patel N. 2017. Reliability assessment of AOSpine thoracolumbar spine injury classification system and Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score (TLICS) for thoracolumbar spine injuries: Results of a multicentre study. European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 26:1470–1476.
- Kelly RP, Whitesides TE. 1968. Treatment of lumbodorsal fracture-dislocations. Annals of surgery 167:705–717.
- Kepler CK, Vaccaro AR, Koerner JD, Dvorak MF, Kandziora F, Rajasekaran S, Aarabi B, Vialle LR, Fehlings MG, Schroeder GD, Reinhold M, Schnake KJ, Bellabarba C, Cumhur Öner F. 2016. Reliability analysis of the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system by a worldwide group of naïve spinal surgeons. European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 25:1082–1086.
- Keynan O, Fisher CG, Vaccaro A, Fehlings MG, Oner FC, Dietz J, Kwon B, Rampersaud R, Bono C, France J, Dvorak M. 2006. Radiographic measurement parameters in thoracolumbar fractures: A systematic review and consensus statement of the spine trauma study group. Spine 31:156-165.
- Kluger P. 1991. Handhabung des Wirbelsäulenfixateurs [Entwurf einer Operationsanleitung].
- Kluger P, Gerner HJ. 1986. Das mechanische Prinzip des Fixateur externe zur dorsalen Stabilisierung der Brust- und Lendenwirbelsäule. Unfallchirurgie 12:68–79.
- Knop C, Blauth M, Bastian L, Lange U, Kesting J, Tschernke H. 1997. Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule. Spätergebnisse nach dorsaler Instrumentierung und ihre Konsequenzen. Der Unfallchirurg 100:630–639.
- Lakshmanan P, Jones A, Mehta J, Ahuja S, Davies PR, Howes JP. 2009. Recurrence of kyphosis and its functional implications after surgical stabilization of dorsolumbar unstable burst fractures. The spine journal: official journal of the North American Spine Society 9:1003–1009.
- Landis JR, Koch GG. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 33:159–174.

- Liao J-C, Fan K-F. 2017. Posterior short-segment fixation in thoracolumbar unstable burst fractures - Transpedicular grafting or six-screw construct? *Clinical neurology and neurosurgery* 153:56–63.
- Liljenqvist U, Mommsen U. 1995. Die operative Behandlung thorakolumbaler Wirbelsäulenverletzungen mit dem Fixateur interne und transpedikulärer Spongiosaplastik. *Unfallchirurgie* 21:30–39.
- Lindsey RW, Dick W. 1991. The fixateur interne in the reduction and stabilization of thoracolumbar spine fractures in patients with neurologic deficit. *Spine* 16:140–5.
- Magerl F. 1984. Stabilization of the Lower Thoracic and Lumbar Spine with External Skeletal Fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*:125–141.
- Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S. 1994. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 3:184–201.
- Maier B, Ploss C, Marzi I. 2010. Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule. *Orthopäde* 39:247–255.
- McAfee PC, Yuan HA, Fredrickson BE, Lubicky JP. 1983. The value of computed tomography in thoracolumbar fractures. An analysis of one hundred consecutive cases and a new classification. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 65:461–473.
- McCormack T, Karaikovic E, Gaines RW. 1994. The load sharing classification of spine fractures. *Spine* 19:1741–1744.
- Meakin JR, Gregory JS, Aspden RM, Smith FW, Gilbert FJ. 2009. The intrinsic shape of the human lumbar spine in the supine, standing and sitting postures: Characterization using an active shape model. *Journal of anatomy* 215:206–211.
- Meredith DS, Schreiber JJ, Taher F, Cammisa FP, Girardi FP. 2013. Lower preoperative Hounsfield unit measurements are associated with adjacent segment fracture after spinal fusion. *Spine* 38:415–418.
- Nguyen HS, Shabani S, Patel M, Maiman D. 2015. Posterolateral lumbar fusion: Relationship between computed tomography Hounsfield units and symptomatic pseudoarthrosis. *Surgical neurology international* 6:611–614.
- Nicoll EA. 1949. Fractures of the dorso-lumbar spine. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 31B:376–394.
- Phan K, Rao PJ, Mobbs RJ. 2015. Percutaneous versus open pedicle screw fixation for treatment of thoracolumbar fractures: Systematic review and meta-analysis of comparative studies. *Clinical neurology and neurosurgery* 135:85–92.
- Pickhardt PJ, Pooler BD, Lauder T, del Rio AM, Bruce RJ, Binkley N. 2013. Opportunistic screening for osteoporosis using abdominal computed tomography scans obtained for other indications. *Annals of internal medicine* 158:588–595.

- Polly DW, Kilkelly FX, McHale KA, Asplund LM, Mulligan M, Chang AS. 1996. Measurement of lumbar lordosis. Evaluation of intraobserver, interobserver, and technique variability. *Spine* 21:1530-1536.
- Rajasekaran S, Kanna RM, Schnake KJ, Vaccaro AR, Schroeder GD, Sadiqi S, Oner C. 2017a. Osteoporotic Thoracolumbar Fractures-How Are They Different?-Classification and Treatment Algorithm. *Journal of orthopaedic trauma* 31 Suppl 4:49-56.
- Rajasekaran S, Kanna RM, Schroeder GD, Oner FC, Vialle L, Chapman J, Dvorak M, Fehlings M, Shetty AP, Schnake K, Kandziora F, Vaccaro AR. 2017b. Does the Spine Surgeon's Experience Affect Fracture Classification, Assessment of Stability, and Treatment Plan in Thoracolumbar Injuries? *Global spine journal* 7:309–316.
- Rajasekaran S, Vaccaro AR, Kanna RM, Schroeder GD, Oner FC, Vialle L, Chapman J, Dvorak M, Fehlings M, Shetty AP, Schnake K, Maheshwaran A, Kandziora F. 2017c. The value of CT and MRI in the classification and surgical decision-making among spine surgeons in thoracolumbar spinal injuries. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 26:1463–1469.
- Rasch B. 2008. *Quantitative Methoden: Einführung in die Statistik*. Heidelberg: Springer.
- Reinhold M, Knop C, Beisse R, Audige L, Kandziora F, Pizanis A, Pranzl R, Gercek E, Schultheiss M, Weckbach A, Buhren V, Blauth M. 2009a. Operative Behandlung traumatischer Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule: Teil I: Epidemiologie. *Der Unfallchirurg* 112:33-42, 44-45.
- Reinhold M, Knop C, Beisse R, Audige L, Kandziora F, Pizanis A, Pranzl R, Gercek E, Schultheiss M, Weckbach A, Buhren V, Blauth M. 2009b. Operative Behandlung traumatischer Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule: Teil III: Nachuntersuchung. *Der Unfallchirurg* 112:294–316.
- Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, Dimnet J. 2005. Classification of the Normal Variation in the Sagittal Alignment of the Human Lumbar Spine and Pelvis in the Standing Position. *Spine* 30:346–353.
- Roy-Camille R, Saillant G, Berteaux D, Salgado V. 1976. Osteosynthesis of thoracolumbar spine fractures with metal plates screwed through the vertebral pedicles. *Reconstruction surgery and traumatology* 15:2–16.
- Sadiqi S, Oner FC, Dvorak MF, Aarabi B, Schroeder GD, Vaccaro AR. 2015. The Influence of Spine Surgeons' Experience on the Classification and Intraobserver Reliability of the Novel AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System-An International Study. *Spine* 40:1250-1256.
- Sadiqi S, Verlaan J-J, Lehr AM, Chapman JR, Dvorak MF, Kandziora F, Rajasekaran S, Schnake KJ, Vaccaro AR, Oner FC. 2017. Measurement of kyphosis and vertebral body height loss in traumatic spine fractures: An international study. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the*

- European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 26:1483–1491.
- Scheidt-Nave C. 2003. Osteoporotische Wirbelfrakturen - Epidemiologie und Krankheitslast. *Z Allg Med* 79:135–142.
- Schnake KJ, Bula P, Spiegl UJ, Müller M, Hartmann F, Ullrich BW, Blattert TR. 2017a. Thorakolumbale Wirbelsäulenfrakturen beim alten Menschen: Klassifikation und Therapie. *Der Unfallchirurg* 120:1071–1085.
- Schnake KJ, Schroeder GD, Vaccaro AR, Oner C. 2017b. AOSpine Classification Systems (Subaxial, Thoracolumbar). *Journal of orthopaedic trauma* 31 Suppl 4:14-23.
- Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG, Buchholz AL, Au AG. 2011. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: A tool for osteoporosis management. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 93:1057–1063.
- Schreiber JJ, Hughes AP, Taher F, Girardi FP. 2014. An association can be found between hounsfield units and success of lumbar spine fusion. *HSS journal: the musculoskeletal journal of Hospital for Special Surgery* 10:25–29.
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U. 2014. *Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Shaffer WO, Spratt KF, Weinstein J, Lehmann TR, Goel V. 1990. 1990 Volvo Award in clinical sciences. The consistency and accuracy of roentgenograms for measuring sagittal translation in the lumbar vertebral motion segment. An experimental model. *Spine* 15:741–750.
- Spiegl U, Jarvers J-S, Heyde C-E, Josten C. 2017. Osteoporotic vertebral body fractures of the thoracolumbar spine: Indications and techniques of a 360 degrees -stabilization. *European journal of trauma and emergency surgery: official publication of the European Trauma Society* 43:27–33.
- Spiegl UJA, Jarvers J-S, Heyde C-E, Glasmacher S, Hoh N von der, Josten C. 2016. Zeitverzögerte Indikationsstellung zur additiv ventralen Versorgung thorakolumbalen Berstungsfrakturen: Welcher Korrekturverlust ist zu erwarten. *Der Unfallchirurg* 119:664–672.
- Stagnara P, Mauroy JC de, Dran G, Gonon GP, Costanzo G, Dimnet J, Pasquet A. 1982. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: Approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine* 7:335–342.
- Street J, Lenehan B, Albiets J, Bishop P, Dvorak M, Fisher C. 2009. Intraobserver and interobserver reliability of measures of kyphosis in thoracolumbar fractures. *The spine journal: official journal of the North American Spine Society* 9:464–469.
- Tscherne H, Blauth M. 1998. *Tscherne Unfallchirurgie: Wirbelsäule*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Vaccaro A, Kandziora F, Fehlings M, Shanmughanathan R. 2014. Posterior short segment fixation with Schanz pins: AO Surgery Reference. URL:

https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/04_Sj9CPyk-ssy0xPLMnMz0vMAfGjzOKN_A0M3D2DDbz9_UMM-DRyDXQ3dw9wMDAwCTYEKlvEocDQnTr8BDuBoQEh_QW5oKABae-vup/dl5/d5/L0IDU0IKSWdrbUEhIS9JRFJBQUlpQ2dBek15cXchLz-RKQ2hEb01kdEJnY2huQVZHRUEhL1o3XzJPMDDBHS-VMwS09PVDEwQVNFMUdWRjAwMDYzLzA!/?showPage=redfix&bone=Spine&segment=TraumaThoracolumbar&classification=53-A3&treatment=operative&method=Posterior+short+segment+fixation+with+Schanz+pins&implantstype=&approach=&redfix_url= [Stand: 29.03.2018].

- Vaccaro AR, Lehman RA, JR, Hurlbert RJ, Anderson PA, Harris M, Hedlund R, Harrop J, Dvorak M, Wood K, Fehlings MG, Fisher C, Zeiller SC, Anderson DG, Bono CM, Stock GH, Brown AK, Kuklo T, Oner FC. 2005. A new classification of thoracolumbar injuries: The importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status. *Spine* 30:2325–2333.
- Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, Reinhold M, Aarabi B, Kandziora F, Chapman J, Shanmuganathan R, Fehlings M, Vialle L. 2013. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: Fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine* 38:2028–2037.
- Vaccaro AR, Schroeder GD, Kepler CK, Cumhur Oner F, Vialle LR, Kandziora F, Kerner JD, Kurd MF, Reinhold M, Schnake KJ, Chapman J, Aarabi B, Fehlings MG, Dvorak MF. 2016. The surgical algorithm for the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 25:1087–1094.
- Verheyden AP, Hölzl A, Ekkerlein H, Gercek E, Hauck S, Josten C, Kandziora F, Katscher S, Knop C, Lehmann W, Meffert R, Müller CW, Partenheimer A, Schinkel C, Schleicher P, Schnake KJ, Scholz M, Ulrich C. 2011. Therapieempfehlungen zur Versorgung von Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule. *Der Unfallchirurg* 114:9–16.
- Verlaan JJ, Diekerhof CH, Buskens E, van der Tweel I, Verbout AJ, Dhert WJA, Oner FC. 2004. Surgical treatment of traumatic fractures of the thoracic and lumbar spine: A systematic review of the literature on techniques, complications, and outcome. *Spine* 29:803–814.
- Vrtovec T, Pernus F, Likar B. 2009. A review of methods for quantitative evaluation of spinal curvature. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 18:593–607.
- Wälchli B, Heini P, Berlemann U. 2001. Korrekturverlust nach dorsaler Stabilisierung von Berstungsfrakturen des thorakolumbalen Übergangs. *Der Unfallchirurg* 104:742–747.

- Wang X-Y, Dai L-Y, Xu H-Z, Chi Y-L. 2008. Kyphosis recurrence after posterior short-segment fixation in thoracolumbar burst fractures. *Journal of neurosurgery. Spine* 8:246–254.
- Watson Jones R. 1931. Manipulative Reduction of Crush Fractures of the Spine. *British Medical Journal* 1:300–302.
- Whitesides TE. 1977. Traumatic kyphosis of the thoracolumbar spine. *Clinical Orthopaedics and Related Research*:78–92.
- Yacoub AR, Joaquim AF, Ghizoni E, Tedeschi H, Patel AA. 2017. Evaluation of the safety and reliability of the newly-proposed AO spine injury classification system. *The journal of spinal cord medicine* 40:70–75.
- Zhang C, Ouyang B, Li P, Wang L, Luo L, Zhao C, Liu L, Tu B, Hou T, Arnold P, Zhou Q. 2017. A Retrospective Study of Thoracolumbar Fractures Treated with Fixation and Nonfusion Surgery of Intravertebral Bone Graft Assisted with Balloon Kyphoplasty. *World neurosurgery* 108:798–806.

10 Anhang

10.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigens erstellte physiologische Referenzwerte des thorakolumbalen Übergangs und der Lendenwirbelsäule; negative bzw. positive Werte entsprechen kyphotischen bzw. lordotischen Winkeln.	25
Tabelle 2: Häufigkeiten der HU-Gruppen in der Gesamtstichprobe und in den OP-Gruppen.....	34
Tabelle 3: Häufigkeiten der HU-Gruppen in der Teilstichprobe und in den OP-Gruppen.....	40

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dendrogramm zur Veranschaulichung der Stichprobenziehung und der Aufteilung in Gesamt- und Teilstichprobe.....	27
Abbildung 2: Veränderung der mittleren bGDW über die Zeit (T1 bis T4) in der Gesamtstichprobe.	28
Abbildung 3: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in der Gesamtstichprobe.	29
Abbildung 4: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in den OP-Gruppen in der Gesamtstichprobe.....	30
Abbildung 5: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Gesamtstichprobe.....	31
Abbildung 6: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen in der Gesamtstichprobe.	31
Abbildung 7: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Gesamtstichprobe.....	32
Abbildung 8: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen der Gesamtstichprobe...	33
Abbildung 9: Veränderung der mittleren bGDW über die Zeit (T1 bis T4) in der Teilstichprobe.	35
Abbildung 10: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in der Teilstichprobe.	36
Abbildung 11: Prozentuale Häufigkeiten der Wirbelsäulenverletzungen in den OP-Gruppen in der Teilstichprobe.....	36
Abbildung 12: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Teilstichprobe.	37
Abbildung 13: Prozentuale Häufigkeiten der nach AOSpine-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen in der Teilstichprobe....	38
Abbildung 14: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in der Teilstichprobe.....	39
Abbildung 15: Prozentuale Häufigkeiten der nach McCormack-Klassifikation klassifizierten Frakturen in den OP-Gruppen in der Teilstichprobe....	39

Abbildung 16: Vergleich der Mittelwerte der Reposition von T1 bis T2 [°] zwischen den OP-Gruppen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall an.....	41
Abbildung 17: Vergleich der Mittelwerte der Differenz zwischen bGDW zum Zeitpunkt T2 und bGDW der eigens erstellten physiologischen Referenzwerte [°] zwischen den OP-Gruppen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall an.....	42
Abbildung 18: Signifikanter Repositionsverlust von T2 zu T4 sowohl in der Kluger- als auch in der AOSpine-Gruppe.....	43
Abbildung 19: Vergleich der Mittelwerte der Differenz zwischen bGDW zum Zeitpunkt T4 und T3 [°] zwischen den HU-Gruppen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall an.	44

10.3 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. G. O. Hofmann, Dr. med. B. W. Ullrich, Dipl. Sportwiss. Philipp Schenk, Dr. med. Florian Wuthe, Sebastian Wussow,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Ort, Datum

Unterschrift der Verfasserin